

# **CARACTERIZACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA DEL RÍO LOA (CHILE) CON EL PROGRAMA HYDRO-BID**

## **HYDROGRAPHIC CHARACTERIZATION OF THE LOA RIVER BASIN (CHILE) WITH THE HYDRO-BID SOFTWARE**

### **MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**D<sup>a</sup> CAROLINA GALLIS FUENTES**

**Dirigido por:**

**Dr. D. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR**

**Alcalá de Henares, a 06 de septiembre de 2021**

## ÍNDICE

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. OBJETIVOS .....	7
2.1. Objetivo principal .....	7
2.1. Objetivos específicos.....	7
3. SOBRE HYDRO-BID .....	8
4. METODOLOGÍA.....	8
4.1. Recopilación de antecedentes.....	8
4.2. Preparación de datos.....	9
4.2.1. Datos climáticos .....	9
4.2.2. Caudales diarios.....	10
4.2.3. Entradas/salidas puntuales.....	10
4.2.4. Datos de embalses.....	10
4.3. Modelación del Sistema en Hydro-BID .....	11
4.3.1. Calibración y validación del modelo.....	11
4.3.2. Simulación de escenarios .....	12
5. RESULTADOS .....	13
5.1. Recopilación de antecedentes y preparación de datos .....	13
5.1.1. Antecedentes generales .....	13
5.1.2. Temperatura y precipitaciones.....	15
5.1.3. Caudales diarios.....	17
5.1.1. Entradas/salidas puntuales.....	23
5.1.2. Datos de embalses.....	24
5.2. Modelación del Sistema en Hydro-BID .....	24
5.2.1. Calibración y validación del modelo.....	24
5.2.2. Simulación de escenarios .....	29
6. DISCUSIÓN.....	43
7. CONCLUSIONES .....	46
8. BIBLIOGRAFÍA.....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo de archivo de datos meteorológicos tipo CSV entregado por el NCEP.....	16
Tabla 2. Ejemplos de archivos de datos tipo CSV de temperatura media (izquierda) y precipitación (derecha) para ingreso a la herramienta de interpolación de data de clima de Hydro-BID.....	17
Tabla 3. Características de estación de control fluviométrico DGA Río Loa en Desembocadura.....	18
Tabla 4. Características de estación de control fluviométrico DGA Río Loa D. J. San Salvador.....	20
Tabla 5. Estadísticos de las estaciones de control fluviométrico DGA Río Loa en Desembocadura y Río Loa D. J. San Salvador.....	22
Tabla 6. Características del Embalse Conchi.....	24
Tabla 7. Calibración del modelo Hydro-BID para la cuenca del río Loa.....	25
Tabla 8. Balance hídrico del Caso Base ( $m^3$ ).....	30
Tabla 9. Balance hídrico del Escenario 1 ( $m^3$ ).....	32
Tabla 10. Balance hídrico del Escenario 2 ( $m^3$ ).....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Precipitaciones mensuales en Santiago y Visviri.....	2
Figura 2. Representación esquemática de la circulación en superficie durante el verano en Sudamérica. En flechas blancas se representa el viento. El área de color amarillo, corresponde a la zona de mayor calentamiento y formación de una baja presión en superficie.....	3
Figura 3. Alta de Bolivia desplazada hacia el sur y su aporte en la formación de episodios de lluvias en el Altiplano.....	4
Figura 4. Alta de Bolivia desplazada hacia el norte.....	4
Figura 5. Inundación en una calle de Calama efecto del desborde del río Loa (febrero de 2019).....	5
Figura 6. Cuenca del río Loa.....	14
Figura 7. Localización de los puntos de control meteorológicos del NCEP con respecto a la cuenca del río Loa.....	16
Figura 8. Localización de la estación Río Loa en Desembocadura con respecto a la cuenca del río Loa y las cuencas de la base de datos de Hydro-BID que drenan hacia ella.....	18
Figura 9. Caudales registrados en estaciones Río Loa en Desembocadura y Río Loa D. J. San Salvador, período 1994 – 2014.....	21
Figura 10. Correlación entre estaciones fluviométricas Río Loa en Desembocadura y Río Loa D. J. San Salvador.....	23
Figura 11. Curva de evolución diaria de caudales observados en la estación fluviométrica Río Loa en Desembocadura.....	26
Figura 12. Curvas de evolución temporal (diaria) de caudales observados y caudales simulados en la estación fluviométrica Río Loa en Desembocadura, entregada por Hydro-BID.....	27
Figura 13. Curva de evolución mensual de caudales observados en la estación fluviométrica Río Loa en Desembocadura, elaborada con los resultados de Hydro-BID.....	28
Figura 14. Curvas de evolución temporal de temperatura en Caso Base y Escenario 1.....	33
Figura 15. Curvas de evolución temporal de caudales en Caso Base y Escenario 1.....	34
Figura 16. Curvas de evolución temporal de caudales en Caso Base y Escenario 2.....	38
Figura 17. Curvas de evolución temporal de precipitaciones.....	40
Figura 18. Curvas de evolución temporal de evapotranspiración.....	40
Figura 19. Curvas de evolución temporal de almacenamiento no saturado.....	41
Figura 20. Curvas de evolución temporal de almacenamiento saturado.....	41
Figura 21. Curvas de evolución temporal de recarga.....	42
Figura 22. Curvas de evolución temporal de caudal.....	42

## TABLA DE ABREVIATURAS

AHD: Base de Datos de Hidrología Analítica

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

DGA: Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile

GCM: Modelo de circulación general

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

NCEP: *National Centers for Environmental Prediction*

CB: Caso Base

E1: Escenario 1

E2: Escenario 2

E3: Escenario 3

## RESUMEN

El presente estudio corresponde a la modelación hidrológica de la cuenca del río Loa, localizada en el norte de Chile, mediante el software Hydro-BID, desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). El objetivo del estudio es conocer las variables hidrológicas más influyentes en el comportamiento de la cuenca del río Loa, tomando en consideración las fuertes crecidas observadas en su cauce en los meses de verano. Las crecidas en este cauce coinciden con la ocurrencia de fuertes precipitaciones estivales en la parte alta de su cuenca, ubicada en el altiplano de la Cordillera de Los Andes. El fenómeno de precipitaciones altiplánicas estivales se conoce como “invierno altiplánico” o “invierno boliviano”, que se caracteriza por intensas tormentas de origen convectivo sobre los 4.000 msnm. Las precipitaciones del resto del país, en cambio, se concentran en los meses de invierno, asociadas a sistemas frontales y temporales.

En este trabajo se explica el proceso de recopilación de datos, calibración y validación del modelo Hydro-BID y se exponen las principales consecuencias de la falta de un registro óptimo de caudales en el río en estudio para efectos de la simulación propuesta.

Teniendo como herramienta este modelo, se realizaron las simulaciones de 2 escenarios climáticos basados en proyecciones de cambio climático: un escenario con un aumento importante en la temperatura de la cuenca, y un segundo escenario con un incremento un poco menor en temperatura, sumado a un incremento en las precipitaciones.

A partir del análisis de los resultados de las simulaciones, se confirma que el principal factor hidrológico que actúa en la generación de crecidas en el río Loa son las precipitaciones asociadas al fenómeno denominado “invierno boliviano” en la parte alta de su cuenca, el cual determina los aumentos extremos en el caudal del río. Sin embargo, se identifica una importante influencia de la temperatura en otras variables hidrológicas, como son la evapotranspiración y la recarga al acuífero.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Altiplano chileno, ubicado a más de 4 mil metros de altura entre las regiones de Arica-Parinacota y Antofagasta, es una amplia meseta en medio de la Cordillera de Los Andes. En esta zona, el régimen de lluvias es muy distinto al de las zonas habitadas del país. En la zona central, donde se encuentra la ciudad de Santiago, el verano es generalmente seco y caluroso y las lluvias sólo llegan entre abril y septiembre.

El comportamiento de precipitaciones del Altiplano chileno también difiere del comportamiento de la mayor parte del norte de Chile, que se caracteriza por ser muy árido. Por ejemplo, en la ciudad de Visviri, el poblado más nortino del país ubicado en la frontera entre Chile, Perú y Bolivia, a 4.100 metros de altura, llueve sólo un poco menos que en Santiago. La salvedad es que llueve en una estación del año completamente diferente.

Tal como se aprecia en la siguiente figura, Santiago y Visviri tienen un peak similar de aproximadamente 80 mm en su mes más lluvioso, salvo que en la capital ocurre en junio (invierno) y en la localidad del Altiplano, en enero (verano).



**Figura 1.** Precipitaciones mensuales en Santiago y Visviri.

La forma en que llueve también es diferente. Mientras en la zona centro los inviernos están asociados a temporales y sistemas frontales que traen varias horas (o incluso días) de lluvia, en la zona altiplánica las precipitaciones son de origen convectivo, es decir, se producen nubes de gran desarrollo vertical que generan tormentas eléctricas y chubascos.

El esquema de la Figura 2 a continuación representa la formación del fenómeno de lluvias altiplánicas.



**Figura 2.** Representación esquemática de la circulación en superficie durante el verano en Sudamérica. En flechas blancas se representa el viento. El área de color amarillo, corresponde a la zona de mayor calentamiento y formación de una baja presión en superficie.

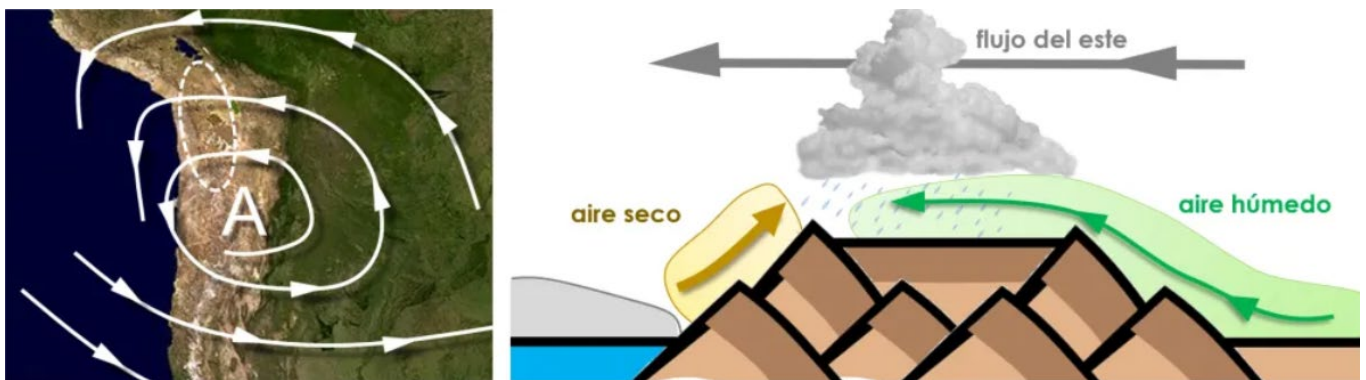
Durante la época de verano, a nivel de continente, Sudamérica registra una importante alza de temperaturas, especialmente en la parte central. Tal como se observa en la Figura 2 anterior, en el área de color amarillo se concentra el calor excesivo, entre Brasil, Argentina, Bolivia y Paraguay, formando un sistema de baja presión generalizado. En esta zona y debido al calentamiento, el aire comienza a ascender por convección.

La baja presión tiene un largo alcance: es capaz de producir el arrastre de la humedad desde el Océano Atlántico Ecuatorial. Este aire viene cargado de humedad, cruza todo el Amazonas y cuando arriba a la zona de la baja presión, es forzado a ascender. A raíz de ello, las tormentas explotan en las tardes de verano de esta zona.

Por otra parte, mientras en superficie se tiene una baja presión, la fuerte convección y la consecuente liberación de calor latente producto del cambio de fase del agua sobre los 10 mil metros de altura produce todo lo contrario en niveles altos: una rotación anticiclónica (donde el viento gira en sentido antihorario en el hemisferio sur), conocido como Alta de Bolivia. Durante el verano la Alta de Bolivia sufre intensificaciones y debilitamientos, así como movimientos hacia el norte y el sur. Todo esto afecta de manera importante a las lluvias del Altiplano.

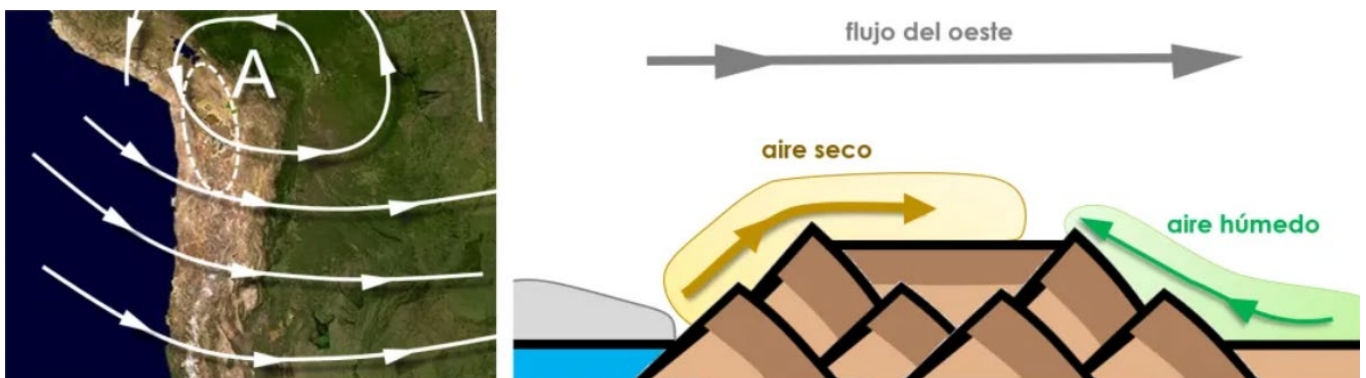
A pesar de que gran parte de Sudamérica posee una alta humedad, ésta es incapaz de escalar la cordillera de Los Andes hasta los 4.000 metros de altura sin la ayuda de algún fenómeno que mueva las masas de aire. En términos simples, es necesario que de alguna manera el viento haga subir la humedad hasta el Altiplano, para lo cual es muy importante que este viento sea predominante del Este, así la humedad presente en el continente puede alcanzar las alturas de la Cordillera de Los Andes.

Cuando el flujo de aire en niveles altos es mayormente desde el Este, en ocasiones asociado a una Alta de Bolivia desplazada hacia el sur, se produce un arrastre de la humedad (ver flecha de color verde en Figura 3, a continuación) y de convección hacia las alturas. La humedad finalmente llega a una de las regiones más altas del planeta y es capaz de producir intensas precipitaciones vespertinas en localidades como Visviri, Putre, Colchane y Toconao, en el norte de Chile. En ocasiones, el flujo es capaz de cruzar la Cordillera de Los Andes, alcanzando localidades precordilleranas y los valles del Desierto de Atacama, como lo es San Pedro de Atacama, Calama y el valle de Azapa.



**Figura 3.** Alta de Bolivia desplazada hacia el sur y su aporte en la formación de episodios de lluvias en el Altiplano.

En el caso contrario, cuando la Alta de Bolivia está muy retraída hacia el norte, el flujo de aire predominante sobre la alta planicie de Chile es mayormente del Oeste. Este aire en general es seco e incapaz de ayudar a producir convección y tormentas. En la Figura 4, este aire seco es representado en color amarillo. El aire húmedo permanece al otro lado de la cordillera de Los Andes.



**Figura 4.** Alta de Bolivia desplazada hacia el norte.



Durante la época de verano, cuando las tormentas sobre el Amazonas y Sudamérica alcanzan su peak, se establece de manera muy clara la circulación de la Alta de Bolivia, fenómeno que juega un rol fundamental para las lluvias en el Altiplano. El fenómeno de precipitaciones altiplánicas estivales se conoce como “invierno altiplánico” o “invierno boliviano”.

En ocasiones, las intensas precipitaciones altiplánicas, generalmente concentradas en un par de horas, producen la activación de quebradas y esteros, junto al aumento de los caudales de los ríos, pudiendo producir importantes daños a personas y la infraestructura del norte.

El río Loa es un cauce natural existente en la Región de Antofagasta, en el norte de Chile. Es el río más extenso del país, con una longitud de 440 km. Nace a más de 4.000 msnm en la Cordillera de Los Andes y su régimen de caudales muestra un claro incremento en los meses de verano a causa de las precipitaciones altiplánicas.

Durante el verano de 2019, el río Loa sufrió una crecida excepcional a causa de intensas lluvias altiplánicas. Este evento provocó una crecida inusual en el río, la cual ocasionó inundaciones y daños por su desborde y el arrastre de material suspendido hacia zonas urbanas. En particular, la localidad minera de Calama, ubicada a 2.400 msnm y aledaña al tramo medio del río Loa, se vio afectada por la crecida del río y el consiguiente desborde de varios canales al interior de la ciudad, situación que provocó la inundación de calles en varios sectores.



**Figura 5.** Inundación en una calle de Calama efecto del desborde del río Loa (febrero de 2019).

Se considera que la repetida ocurrencia de desbordes de este río que transcurre en la zona más árida del país tiene efectos graves para la seguridad de la población y la infraestructura. Es así que, mediante el presente trabajo, se busca obtener una mejor comprensión de los factores desencadenantes de estos eventos.

A fin de entender con más detalle el comportamiento hidrológico del río Loa, se recopilamos los datos históricos disponibles de las variables climáticas en la cuenca y de los caudales en el cauce del río, para determinar a grandes rasgos su funcionamiento, a través de un balance hídrico. Para realizar este balance y contar con una herramienta para simular sus variaciones ante condiciones climatológicas probables de ocurrir, se utilizó el software de modelación hidrológica Hydro-BID, diseñado por el Banco Interamericano del Desarrollo (BID) como apoyo a la gestión de recursos hídricos en Latinoamérica y El Caribe. Con Hydro-BID se elaboró el modelo del río Loa con sus correspondientes entradas y salidas, basado en la información pluviométrica y fluviométrica disponible.

Con el modelo del río Loa elaborado en Hydro-Bid, fue posible establecer una situación base o inicial y, posteriormente, analizar diferentes escenarios de variaciones climáticas para determinar su efecto sobre el río, con foco en la relación entre la magnitud de las precipitaciones, la temperatura y los caudales de crecida alcanzados.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo principal**

El objetivo de este estudio es conocer el comportamiento hidrológico del río Loa, a fin de observar y entender en mayor detalle los factores que influyen en los eventos de crecidas que ocurren en su cauce.

### **2.1. Objetivos específicos**

Se identifican a continuación los objetivos específicos del presente estudio:

1. Identificar estaciones fluviométricas y meteorológicas con registros representativos de la cuenca del río Loa, y recopilar esta información;
2. Identificar obras hidráulicas existentes con influencia en el comportamiento del río Loa y conocer su reglamento de operación;
3. Llevar la información recopilada al software Hydro-BID para generar un modelo de la cuenca del río Loa;
4. Realizar la calibración del modelo generado mediante el uso de datos existentes y el consiguiente análisis de ajuste;
5. Establecer escenarios de cambio climático aplicables al área de la cuenca del río Loa, que afecten una o más de las variables ingresadas al modelo;
6. Realizar simulaciones del comportamiento hidrológico del río Loa bajo los escenarios de cambio climático establecidos;
7. Comparar los resultados de las simulaciones efectuadas para el caso base y los escenarios de cambio climático;
8. Identificar qué variables son determinantes en el comportamiento del río Loa;
9. Con base en el conocimiento adquirido de la modelación del sistema del río Loa, identificar los agentes naturales y/o antrópicos que colaboran en magnificar sus eventos de crecidas y proponer soluciones para evitar o reducir la vulnerabilidad de las localidades afectadas; y
10. Realizar una discusión sobre la aplicabilidad del modelo Hydro-BID para la cuenca del río Loa, destacando las particularidades más relevantes del caso en estudio, con respecto a la simulación de casos y obtención de resultados con un grado de confianza satisfactorio.

### 3. SOBRE HYDRO-BID

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ofrece asistencia financiera y técnica para proyectos de infraestructura en agua y saneamiento, irrigación, control de inundaciones, transporte y energía. Como parte de su compromiso de ayudar a los países de Latinoamérica y el Caribe en la adaptación al cambio climático, el BID desarrolló un conjunto integrado de herramientas de simulación de cuencas conocidas como Hydro-BID. El sistema de simulación Hydro-BID incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad (volúmenes y caudales) de agua dulce a escalas regional, de cuencas y de subcuencas. La versión actual de Hydro-BID cuenta con los siguientes componentes:

- Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) para la región de América Latina y el Caribe, representando más de 229.000 cuencas y sus correspondientes segmentos fluviales;
- Una herramienta de navegación basada en un sistema de información geográfica para ver/buscar cuencas y corrientes de la AHD con la capacidad de navegar aguas arriba y aguas abajo;
- Una interfaz de usuario para determinar específicamente el área y el periodo de tiempo a ser simulado y la ubicación donde la disponibilidad de agua será simulada;
- Una interfaz de datos climáticos para generar y aplicar entradas/inputs de precipitación y temperatura para el área y el período de interés;
- Un modelo de precipitación - escorrentía basado en el Factor de Carga de Cauces Generalizados (GWL<sup>1</sup>F, por sus siglas en inglés); y
- Un esquema de cálculo hidráulico (*routing*) para cuantificar el tiempo de viaje y los estimados de flujos a través de las cuencas aguas abajo.

### 4. METODOLOGÍA

#### 4.1. Recopilación de antecedentes

Con el objetivo de realizar la caracterización del sistema hidrológico del río Loa, se recopilaron los antecedentes bibliográficos disponibles y se revisaron los registros de las estaciones de control de la DGA<sup>1</sup> a lo largo del río Loa, cuya estadística se encuentra disponible para consulta a través del sitio web <http://www.dga.cl>. De estas estaciones, se seleccionarán aquellas más representativas para los objetivos de este estudio, con suficientes datos para los análisis requeridos. En caso de que no se cuente con información meteorológica suficiente a través de los registros de estaciones meteorológicas oficiales, se utilizará la información de modelos climáticos recomendados para el sector de estudio, usando como referencia la información de *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos.

---

<sup>1</sup> La Dirección General de Aguas (DGA) pertenece al Ministerio de Obras Públicas de Chile y es el organismo que se encarga de gestionar, verificar y difundir la información hídrica del país, en especial con respecto a su cantidad y calidad, a las personas naturales y jurídicas que están autorizadas a utilizarlas, así como a las obras hidráulicas existentes y la seguridad de las mismas.

Se realizó la búsqueda de los estudios oficiales sobre el área de estudio en el Catálogo Bibliográfico de la Dirección General de Aguas (DGA), al cual es posible acceder a través del sitio web <http://sad.dga.cl/>.

## **4.2. Preparación de datos**

### **4.2.1. Datos climáticos**

El software HydroBID cuenta con una Base de Datos Hidrográfica Analítica de América Latina y el Caribe (*LAC-AHD*, por sus siglas en inglés), la cual posee una estructura de cuencas de polígono anidado en que cada una se identifica a través de un número único denominado COMID. Cada cuenca contiene, a su vez, segmentos fluviales estructurados que forman los cauces presentes en ella. Esta base de datos incorpora atributos descriptivos que crean un sistema interconectado de segmentos fluviales aguas arriba, aguas abajo y entre cuencas, la cual permite añadir atributos adicionales al modelo.

Sin embargo, la base de datos *LAC-AHD* no incorpora registros de precipitaciones y temperaturas en los polígonos de las cuencas. Esta información debe ser ingresada a la base de datos a través de la herramienta de interpolación de datos de clima (*Climate Data Interpolation Tool*) de HydroBID. Esta herramienta permite ingresar la información climática diaria de las estaciones meteorológicas representativas del área de estudio, a partir de la cual, en función de las coordenadas geográficas de dichas estaciones, HydroBID asociará un valor diario de precipitaciones y temperatura para cada una de las cuencas de interés, generando así la planilla de clima de la base de datos.

El ingreso de datos a la Plataforma HydroBID se realiza mediante archivos en formato CSV o de valores separados por comas. Para generar la planilla de clima de la base de datos, es necesario contar con los siguientes archivos en formato CSV:

- Coordenadas de los centroides de cada una de las subcuencas definidas por Hydro-BID para la cuenca hidrográfica en estudio, organizadas por longitud, latitud y el identificador COMID de la cuenca;
- Coordenadas de las estaciones de control meteorológico cuyos registros de precipitaciones y temperaturas diarias alimentarán el modelo, organizadas por nombre de estación, longitud y latitud;
- Un archivo de temperatura media diaria por cada estación o punto de control, organizado por fecha y temperatura media en grados Celsius; y
- Un archivo de precipitaciones diarias por cada estación o punto de control, organizado por fecha y precipitación en centímetros.

Para recopilar la información meteorológica de la cuenca del río Loa se revisaron los registros existentes de las estaciones de control de la DGA a través del sitio [www.dga.cl](http://www.dga.cl), así como de la base de datos de libre acceso del *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) en el sitio <https://globalweather.tamu.edu/> para la zona en estudio.

#### **4.2.2. Caudales diarios**

Como requisito para la modelación, el software requiere los registros de caudales diarios observados en la salida de la hoya hidrográfica en estudio, registrados en una estación de control fluviométrico ubicada en la subcuenca de salida de ésta, en un archivo de datos en formato CSV organizado por fecha y caudal (en m<sup>3</sup>/s). Para recopilar la información de caudales en la salida de la cuenca en estudio se revisaron los registros existentes de las estaciones de control de la DGA a través del sitio [www.dga.cl](http://www.dga.cl).

#### **4.2.3. Entradas/salidas puntuales**

Hydro-BID permite simular la intervención antrópica en cuencas, como por ejemplo, la presencia de la descarga de un embalse, extracción de aguas o descargas. En el caso de la cuenca del río Loa, se recopiló información bibliográfica de puntos de afloramientos en el cauce principal y algunos afluentes, lo cuales fueron ingresados al modelo.

#### **4.2.4. Datos de embalses**

La plataforma de HydroBID cuenta con un módulo de embalses, el cual permite simular el efecto de la operación de estas obras en la cuenca del cauce en estudio. Para ello, requiere la siguiente información asociada a los embalses presentes y su ubicación en el área de estudio:

- Identificador COMID de la cuenca donde se emplaza;
- Nombre o denominación del embalse;
- Parámetros de forma A y B, que se utilizan para definir la relación entre el volumen y área de superficie del embalse. Si no se conoce esta relación, se recomiendan los siguientes valores por defecto: A = -1; B = -2;
- Coeficiente de evaporación;
- Conductividad hidráulica en cm/día;
- Meses de inicio y fin de la época sin crecidas;
- Volumen principal, equivalente al volumen mínimo útil del embalse en millones de m<sup>3</sup>;
- Descarga diaria promedio en m<sup>3</sup>/día;
- Volumen de inundación, equivalente al volumen máximo del embalse en millones de m<sup>3</sup>;
- Superficie de inundación del embalse en km<sup>2</sup>;
- Promedio diario de descarga en m<sup>3</sup>/día; y
- Volumen inicial al inicio de la simulación en millones de m<sup>3</sup>.

### 4.3. Modelación del Sistema en Hydro-BID

#### 4.3.1. Calibración y validación del modelo

Con la información existente ya ingresada en el modelo, se procedió en primer lugar a calibrar los parámetros hidrológicos del modelo a fin de validarlo con respecto al comportamiento registrado en el río Loa. A continuación, se presentan los parámetros factibles de calibrar en Hydro-BID con una breve explicación de su efecto en los caudales superficiales.

1. Número de Curva (*Curve Number*): parámetro usado para caracterizar el tipo de uso de suelo y representar su comportamiento hidrológico. Un número de curva alto indica una mayor impermeabilización del suelo, la cual favorece la escorrentía superficial e incrementa los caudales simulados. Reducir el número de curva reduce los caudales altos, pues propicia una menor sensibilidad a los eventos de precipitación.
2. Coeficiente de Recesión (*R Coefficient* o RC): caracteriza cómo el agua subterránea cerca de la superficie contribuye a los caudales en los ríos después de un evento de crecida. Un mayor RC representa la disminución de los almacenamientos subterráneos en contacto con las corrientes, produciendo un mayor caudal superficial.
3. Contenido Disponible de Agua (AWC por sus siglas en inglés): estima el monto de agua (en cm) que se puede almacenar en el suelo para ser usado por las plantas, afectando la infiltración hacia las aguas subterráneas. Aumentar el AWC interacciona con el RC y altera el caudal superficial, afectando en particular los caudales bajos.
4. Pérdidas por infiltración (*Seepage*): es el intercambio entre el agua cerca de la superficie hacia las zonas más profundas del terreno y los acuíferos. Reducir el valor de infiltración ocasiona un aumento del volumen de escorrentía.
5. Porcentaje de cubierta impermeable (*Impervious cover percent*): es la porción de la cuenca cuya superficie está cubierta de materiales impermeables que no permiten la infiltración de agua.
6. Factor de Evapotranspiración para Temporada de Crecimiento (*GSET* por sus siglas en inglés): depende de la presencia y del tipo de cultivo e indica un aumento adicional de las pérdidas por evapotranspiración en la temporada de crecimiento. Es así que un aumento en el factor GSET puede disminuir el caudal de escorrentía.
7. Factor de Evapotranspiración para Temporada Dormiente (*DSET* por sus siglas en inglés): depende de la presencia y del tipo de cultivo e indica un aumento adicional de las pérdidas por evapotranspiración en la temporada dormiente. Es así que un aumento en el factor DSET puede

disminuir el caudal de escorrentia.

Cabe señalar que Hydro-BID proporciona estadísticas diarias y mensuales para evaluar el desempeño del modelo, tales como: Error general de volumen, Ove (%), Correlación  $r$ , Correlación modificada  $R_{mod}$  (%) y Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe.

- Error de volumen general (*Overall Volume Error*): indica la media del porcentaje de error entre los valores simulados y los valores observados. Valor óptimo cercano al % de error máximo permitido.
- Correlación (*correlation*) ( $r$ ): analiza las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas. Valor óptimo cercano a 1.
- Coeficiente de correlación modificado (*Modified Correlation Coefficient*) ( $r_{mod}$ ): analiza las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas, aplicando un factor que relaciona los valores mínimos y los máximos. Valor óptimo cercano a 1.
- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (*Nash-Sutcliffe Efficiency Index*) ( $R^2$ ): analiza la magnitud de la relación entre las varianzas de los flujos simulados y las varianzas de los flujos observados. Valor óptimo cercano a 1.

Es importante establecer un criterio para considerar válidos los resultados de la calibración: para ello, se definió como aceptable un error inferior al 30% en el balance hídrico.

Una vez realizados los ajustes necesarios, con el modelo adecuadamente calibrado y validado en función de los caudales observados en la estación de control fluviométrico de la salida de la cuenca hidrográfica de interés, fue posible representar su comportamiento para los diferentes escenarios de estudio.

#### **4.3.2. Simulación de escenarios**

Se evaluaron 2 escenarios representativos de la posible evolución de las condiciones meteorológicas de la cuenca del río Loa, considerando el contexto del cambio climático y la influencia de las precipitaciones en la cuenca.

##### **1. Escenario 1 (E1): Cambio climático según RCP 8,5**

Este escenario toma en consideración una de las trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero establecidas en el Quinto Informe de Evaluación (*AR5*, por sus siglas en inglés) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (*IPCC*), perteneciente a las Naciones Unidas. Las trayectorias de concentración representativas (*RCP*) postulan un valor para el volumen de gases de efecto invernadero (GEI) presentes en la atmósfera a futuro. El AR5 define cuatro RCP en función de la radiación que se estima para el año 2100, consecuencia de los GEI: RCP 2,6 (2,6 W/m<sup>2</sup>), RCP 4,5 (4,5 W/m<sup>2</sup>), RCP 6,0 (6 W/m<sup>2</sup>) y RCP 8,5 (8,5 W/m<sup>2</sup>). El escenario de RCP 8,5 se considera el caso más



desfavorable, en el cual no se genera ningún mecanismo de mitigación de gases de efecto invernadero en la atmósfera y las emisiones mantienen su tendencia al aumento. De acuerdo con el AR5, se estima para este escenario un aumento de temperatura de 2°C (IPCC, 2013).

Este escenario, actualmente, se considera posiblemente sobreestimado, debido a que asume una disponibilidad futura de combustibles fósiles difícil de asegurar. Sin embargo, para efectos de este estudio, se usará como condición más desfavorable para efecto del análisis, tomando en cuenta que, de ser factible, esta condición no está exenta de ser aplicable a la realidad de Chile y Sudamérica.

## 2. Escenario 2 (E2): Cambio climático según GCM CSIRO-Mk2

Otro escenario interesante de evaluar es una proyección de las condiciones meteorológicas basada en el modelo de circulación general (GCM por sus siglas en inglés) denominado CSIRO en su versión Mk2 (Hirst *et al.*, 1996, 1999). Los modelos GCM corresponden a modelos numéricos que permiten estimar el cambio climático en una región del globo, considerando una grilla tridimensional de 250 a 600 km de resolución horizontal y diversas capas verticales representativas de la atmósfera. En el caso del modelo CSIRO-Mk2, se consideran 9 niveles verticales y una resolución de aproximadamente 5,6 x 3,2° (horizontal x vertical). Se basa en el escenario de proyección IS92a del IPCC, de gases de efecto invernadero combinados con aerosol de sulfato. Este escenario estima para el año 2050 un aumento de temperatura de 1,84°C y un incremento de 3,2% en las precipitaciones.

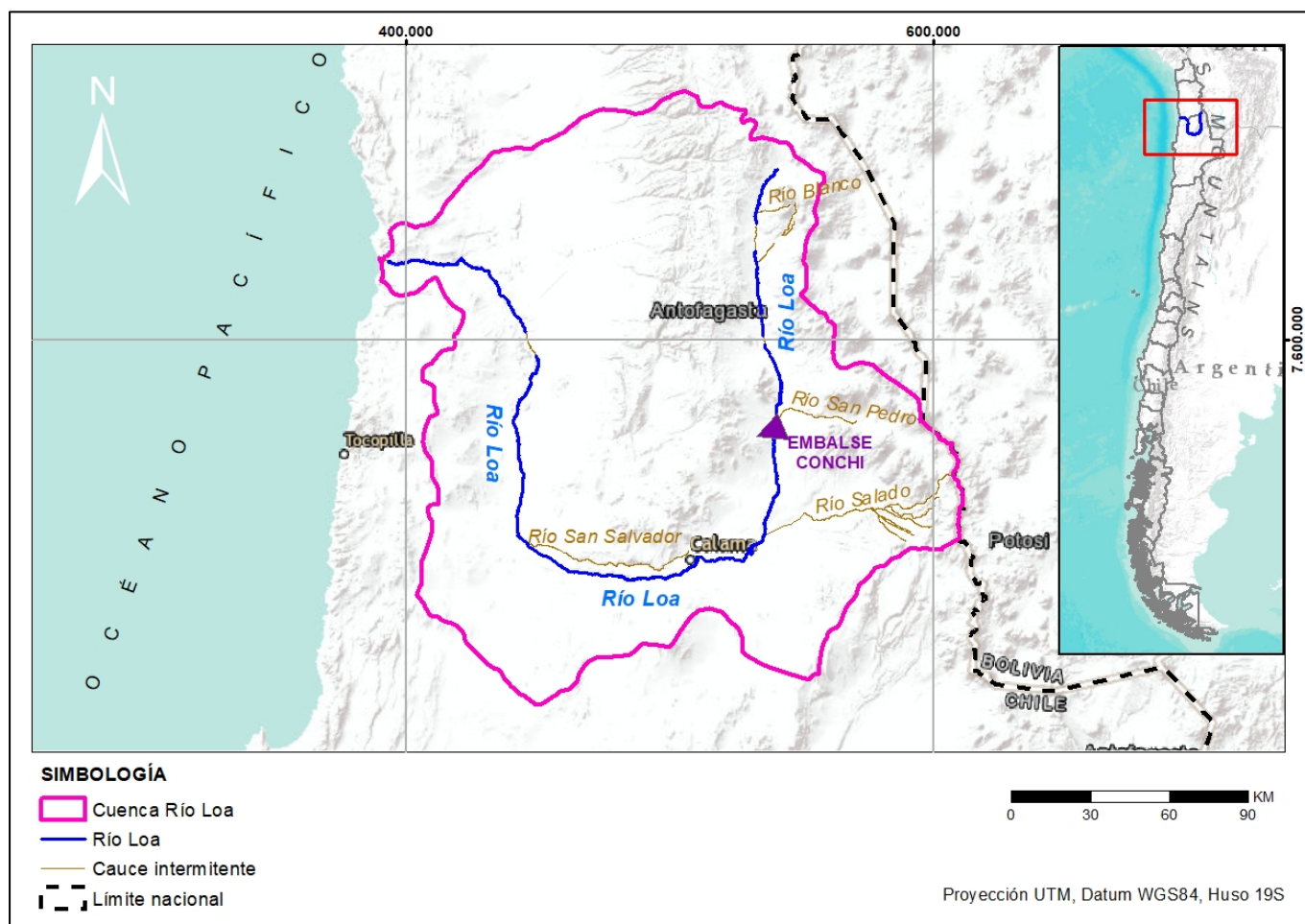
En contraste con el escenario E1, este escenario contempla una variación de temperatura menos extrema y la combina con un efecto en las precipitaciones. Así, conforma un escenario más realista, que tendrá un efecto directo en la escurrentía de la cuenca en estudio.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Recopilación de antecedentes y preparación de datos

#### 5.1.1. Antecedentes generales

La cuenca del río Loa está ubicada en la Región de Antofagasta, en el norte de Chile. El río Loa es el más extenso de este país, con una longitud de 440 km. Su cuenca hidrográfica se extiende por aproximadamente 33.000 km<sup>2</sup>. A continuación, en la Figura 6 se muestra la localización y trazado del río Loa.



**Figura 6.** Cuenca del río Loa.

Como se observa en la Figura 6, la extensa trayectoria del Río Loa es poco lineal. Su cauce nace en el altiplano, a cerca de 4.250 msnm; se extiende hacia el sur por cerca de 150 km, para dirigirse luego al oeste por el desierto de Atacama, pasando por la ciudad de Calama. Justo aguas arriba de las formaciones montañosas costeras, su curso vuelve al norte por cerca de 100 km, hasta abrirse paso al oeste hacia su desembocadura en el Océano Pacífico. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, en su cuenca se distinguen 3 tipos de clima: el de estepa de altura en la parte más alta y oriental de la cuenca (desde 3.500 msnm), subtipo climático desértico interior en la parte intermedia de la cuenca y clima desértico costero con nubosidad abundante en su parte más baja, hacia la desembocadura.

A pesar de su gran longitud y área aportante, los recursos hídricos de la cuenca del río Loa son escasos debido al clima desértico imperante. Para asegurar que se cubra la demanda de agua necesaria para los usuarios que se abastecen del río Loa, se creó el embalse Conchi a cerca de 68 km aguas arriba de la localidad de Calama, el cual entró en operación en 1975. La mayor parte de los derechos de aprovechamiento de aguas constituidos por la Dirección General de Aguas (DGA) sobre las aguas superficiales del río Loa son, actualmente, de propiedad de la industria minera.

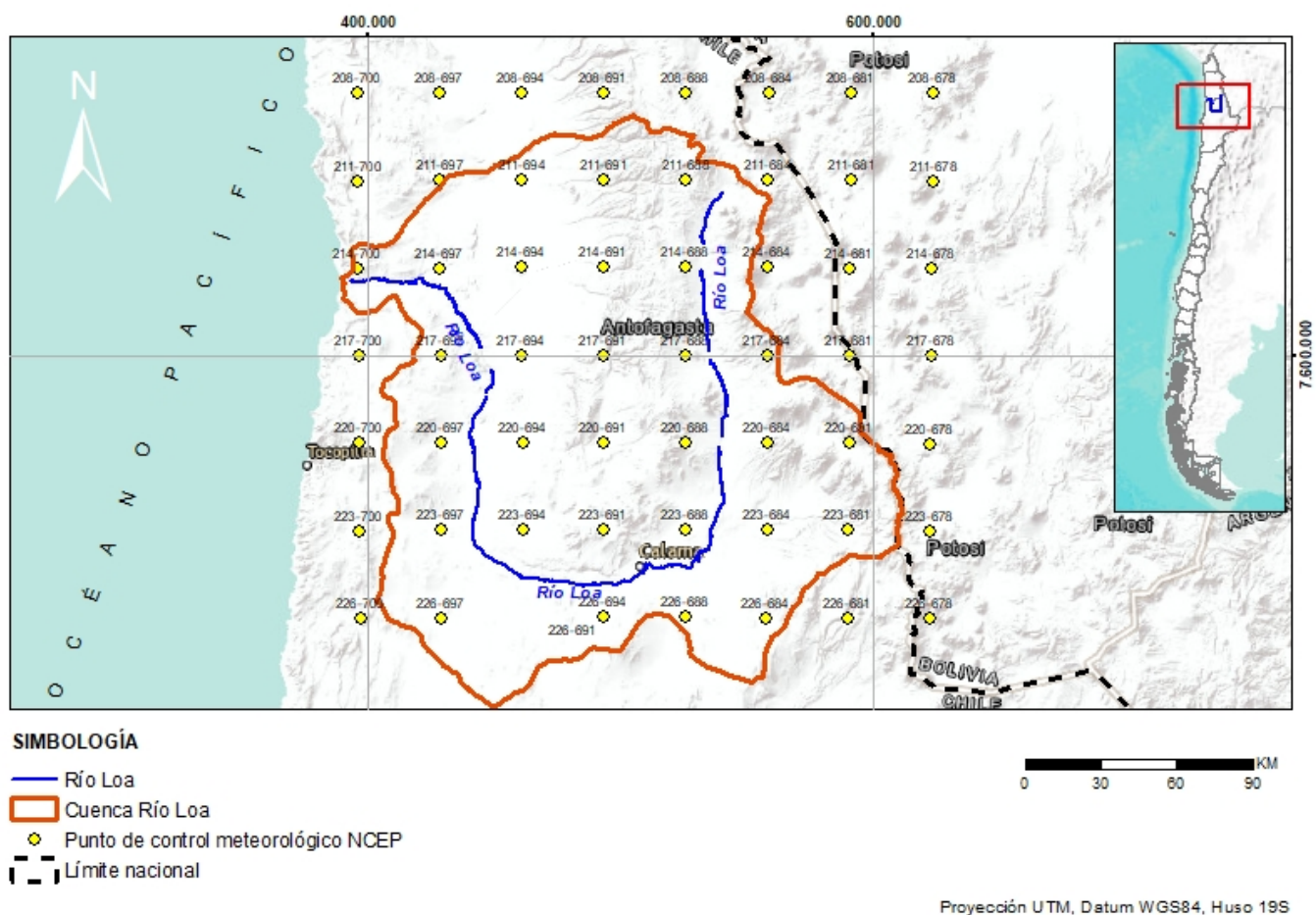
El principal ingreso de aguas ocurre durante los meses de diciembre a marzo, cuando el río recibe las

aguas de las precipitaciones altiplánicas debidas al fenómeno de invierno boliviano, que son drenadas por la extensa cuenca del río Loa.

### **5.1.2. Temperatura y precipitaciones**

Del análisis de las estaciones de control meteorológico de la Red Hidrométrica de la DGA, fue posible identificar 18 estaciones en la cuenca del río Loa que registran datos diarios de precipitación y temperatura. Sin embargo, en gran parte de las estaciones esta información se encuentra descontinuada por períodos importantes. Por esta razón, se dio preferencia a la información meteorológica que provee el NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) en su sitio web. Este sitio permite establecer un cuadrante para el cual entrega las estimaciones de temperatura y precipitaciones de la base de datos del *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), el cual corresponde a un modelo atmosférico global, de alta resolución, diseñado para proveer la mejor estimación del estado del acople entre atmósfera-océano-continente-hielo. De esta forma, es posible contar con información meteorológica diaria y continua para el cuadrante definido.

Es así que para la cuenca del río Loa se estableció un cuadrante que contiene 56 (8 x 7) puntos de estimación de temperatura y precipitaciones diarias. La página establece como límite superior de la base de datos el año 2014, de modo que se obtuvo el registro para el período 1984 – 2014 a fin de contar idealmente con 30 años de información. A continuación, en la Figura 7 se muestra la disposición de los puntos de información entregados por este sitio, los cuales cubren de manera satisfactoria la superficie de la cuenca y se consideran suficientemente representativos de ella.



**Figura 7.** Localización de los puntos de control meteorológicos del NCEP con respecto a la cuenca del río Loa.

El sitio de NCEP entrega un archivo tipo CSV por cada punto de control meteorológico, el cual incluye sus coordenadas geográficas e información diaria de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Ejemplo de archivo de datos meteorológicos tipo CSV entregado por el NCEP.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Date,"Longitude"	"Latitude"	"Elevation"	"Max Temperature"	"Min Temperature"	"Precipitation"		
2	1/1/1984,"-68.4375"	"-20.7632007598877"	"4203"	"14.088"	"4.480999999999999"	"7.1805922488"		
3	1/2/1984,"-68.4375"	"-20.7632007598877"	"4203"	"17.645"	"2.185999999999998"	"2.6298494928"		
4	1/3/1984,"-68.4375"	"-20.7632007598877"	"4203"	"16.838"	"5.338000000000002"	"10.081674036"		
5	1/4/1984,"-68.4375"	"-20.7632007598877"	"4203"	"15.167"	"4.374000000000002"	"10.533143772"		
6	1/5/1984,"-68.4375"	"-20.7632007598877"	"4203"	"12.237"	"5.31"	"16.44172272"		
7	1/6/1984,"-68.4375"	"-20.7632007598877"	"4203"	"8.584999999999998"	"2.958000000000003"	"6.90593184"		
8	1/7/1984,"-68.4375"	"-20.7632007598877"	"4203"	"7.016000000000002"	"2.533999999999999"	"6.19869672"		
9	1/8/1984,"-68.4375"	"-20.7632007598877"	"4203"	"7.860999999999999"	"3.528000000000002"	"12.078096516"		
10	1/9/1984,"-68.4375"	"-20.7632007598877"	"4203"	"13.129"	"2.680999999999998"	"1.9123090344"		

Para elaborar los archivos CSV de temperatura media diaria que requiere la herramienta de interpolación de data de clima (*Climate Data Interpolation Tool*) de Hydro-BID, es necesario promediar las temperaturas máxima y mínima en cada estación y presentar sus resultados en archivos individuales por cada punto de registro o estación, en el formato indicado en el punto 4.2.1 del presente documento. Igualmente, las precipitaciones diarias deben presentarse en archivos individuales por estación, en centímetros. En la Tabla 2 se muestran ejemplos de los archivos de temperatura y precipitaciones de ingreso al modelo.

**Tabla 2.** Ejemplos de archivos de datos tipo CSV de temperatura media (izquierda) y precipitación (derecha) para ingreso a la herramienta de interpolación de data de clima de Hydro-BID.

	A	B
1	Date, Temperature	
2	1/1/1984, 9.2845	
3	2/1/1984, 9.9155	
4	3/1/1984, 11.088	
5	4/1/1984, 9.7705	
6	5/1/1984, 8.7735	
7	6/1/1984, 5.7715	
8	7/1/1984, 4.775	
9	8/1/1984, 5.6945	
10	9/1/1984, 7.905	

	A	B
1	Date, Precip_cm	
2	1/1/1984, 0.718059225	
3	2/1/1984, 0.262984949	
4	3/1/1984, 1.008167404	
5	4/1/1984, 1.053314377	
6	5/1/1984, 1.644172272	
7	6/1/1984, 0.690593184	
8	7/1/1984, 0.619869672	
9	8/1/1984, 1.207809652	
10	9/1/1984, 0.191230903	

Finalmente, se ingresaron los archivos de temperatura, precipitaciones, coordenadas de centroides de cuencas y coordenadas de puntos de registro a la herramienta de interpolación de Hydro-BID, la cual agregó la información de clima a la base de datos.

### 5.1.3. Caudales diarios

Es importante destacar la importancia de la disponibilidad de registros de caudales diarios representativos de la cuenca en estudio para posibilitar la correcta calibración y validación del modelo. Lamentablemente, varias estaciones de control fluviométrico en Chile presentan con frecuencia lapsos importantes sin toma de datos. En particular, en el río Loa, varios períodos sin registros coinciden precisamente con eventos de crecidas, cuando posiblemente la ubicación en el cauce, dificultad de acceso y precariedad de las estaciones ocasionan la interrupción prolongada de los registros.

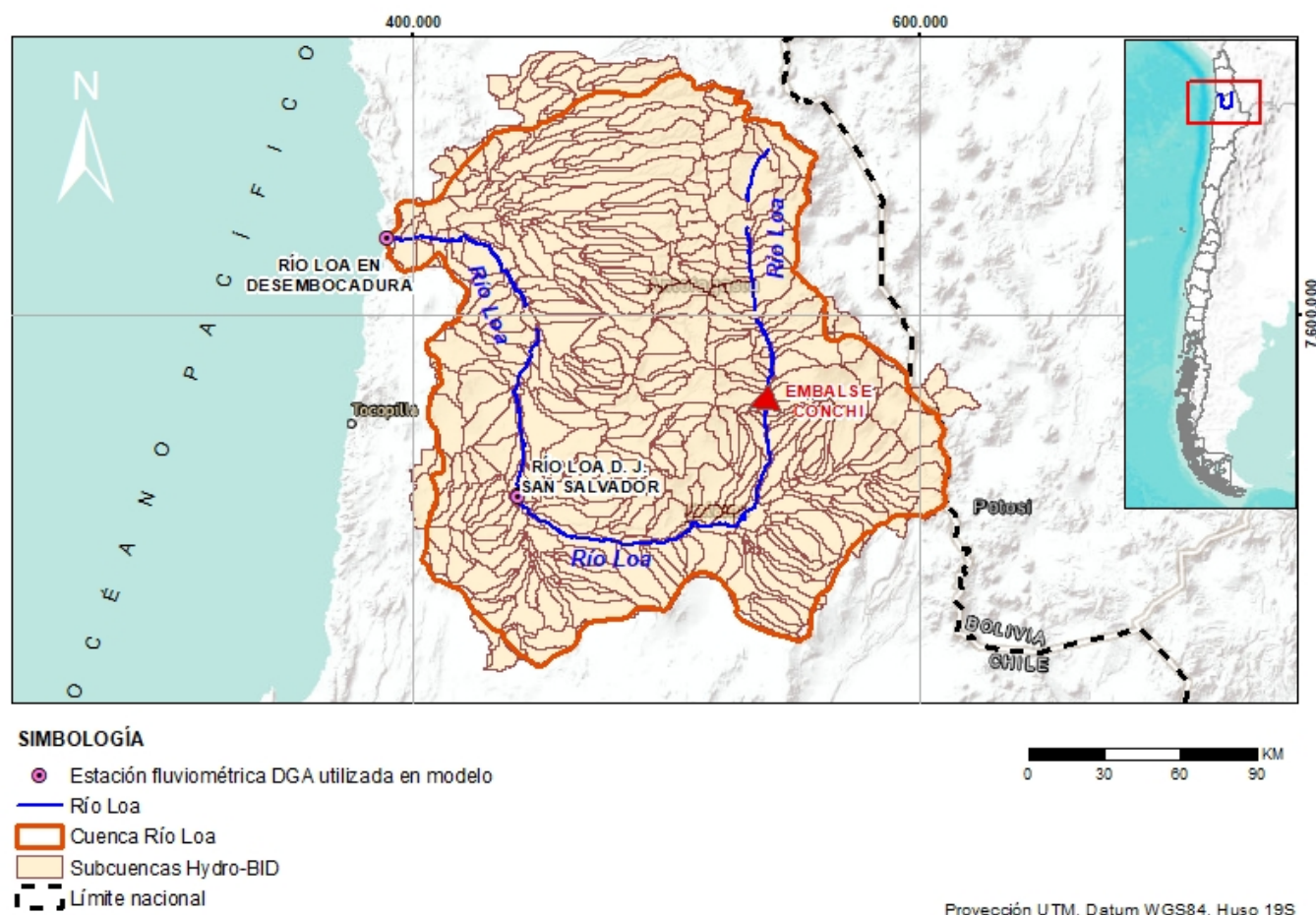
La estación de control fluviométrico utilizada para este estudio corresponde a la estación Río Loa en Desembocadura. En la Tabla 3 a continuación se presentan las características de esta estación.



**Tabla 3.** Características de estación de control fluviométrico DGA Río Loa en Desembocadura.

Parámetro		Valor
Código BNA		02120001-8
Coordenadas UTM Datum WGS84 Huso 19 Sur	Norte	7.630.101
	Este	390.620
Longitud		70°03'19"
Latitud		21°25'40"
Período de registro de caudales diarios		1989-2017 (incompleto)
Estado		Vigente

En la Figura 8 a continuación se muestra la ubicación de esta estación fluviométrica con respecto a la cuenca del río Loa.



**Figura 8.** Localización de la estación Río Loa en Desembocadura con respecto a la cuenca del río Loa y las cuencas de la base de datos de Hydro-BID que drenan hacia ella.

En la Figura 8 también se aprecian todas las cuencas de la base de datos de Hydro-BID cuyas aguas drenadas llegan en última instancia a la cuenca que alberga la estación Río Loa en Desembocadura. Su disposición se aproxima bastante a la delimitación oficial de la cuenca del Río Loa.

Cabe señalar que al analizar los registros de la estación fluviométrica Río Loa en Desembocadura, determinante para estudiar el comportamiento hidrológico del Río Loa, se encontraron algunos problemas. Como se expone en la Tabla 1, esta estación presenta un registro incompleto.

Con el fin de subsanar la situación de registros incompletos, se investigaron metodologías apropiadas para rellenar los datos faltantes en la estación fluviométrica de interés. A continuación, se hace un análisis de las metodologías evaluadas:

**Método de la recesión:** este método se basa en la hipótesis de que, en épocas sin precipitaciones, el flujo base de aguas subterráneas aporta al cauce superficial en cauces mayoritariamente estacionales (Mfwango *et al.*, 2018). Con los registros disponibles del período de estío en el cauce, se relaciona caudal vs. tiempo y se establece una curva de descarga que debe dar cuenta del decaimiento del flujo a medida que la entrega de aguas subterráneas disminuye. Una vez construida, esta curva de descarga se utiliza para el relleno de datos en períodos sin registro fluviométrico que coincidan con épocas del año sin precipitaciones.

**Método de regresión múltiple:** este método contempla la construcción de una correlación de los caudales de una estación con los caudales registrados en múltiples estaciones de cauces cercanos asociados a cuencas de características similares (Mfwango *et al.*, 2018). La expresión de correlación contiene variables dependientes de estas cuencas representativas y se utiliza para el relleno de datos en períodos sin registro fluviométrico en la estación de interés.

**Método de regresión simple:** este método contempla la construcción de una correlación de los caudales de una estación con los caudales registrados en una estación de un cauce cercano asociado a una cuenca de características similares (Mfwango *et al.*, 2018). La expresión de correlación contiene una variable dependiente de esta cuenca representativa y se utiliza para el relleno de datos en períodos sin registro fluviométrico en la estación de interés.

Respecto de las metodologías revisadas, el sistema del río Loa, por sus características, no recibe más entradas que las precipitaciones; no se considera un aporte de aguas subterráneas al cauce. De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, el estudio “Análisis Integrado Río Loa, Región de Antofagasta” (DGA, 2014a) identifica un posible afloramiento de aguas en la parte baja del Río Loa, el cual sin embargo se cuantifica en dicho estudio con un caudal fijo en el tiempo y está contemplado en el modelo como un aporte puntual (ver sección 5.1.1). El método de la recesión propone una tendencia de descenso exponencial para el flujo superficial en épocas sin lluvias, a causa de la reducción del aporte subterráneo. Es por ello que no se considera que el comportamiento del río quede debidamente reflejado por este método, hipótesis que se valida a través de la simulación hidrológica del río a través de Hydro-BID (ver sección 5.2.2. de este informe).

Por otra parte, la metodología de regresiones múltiples requiere más de una estación fluviométrica representativa de la cuenca en estudio, con un registro suficiente y acorde con el período de interés. Este requisito no se cumple para la cuenca del río Loa. Las estaciones de control fluviométrico vigentes en el área de estudio son escasas y no cuentan con los registros suficientes para este análisis. De hecho, se puede decir que es el río Loa el cauce que cuenta con el mejor registro en este sector del país, en cuanto a cantidad de datos.

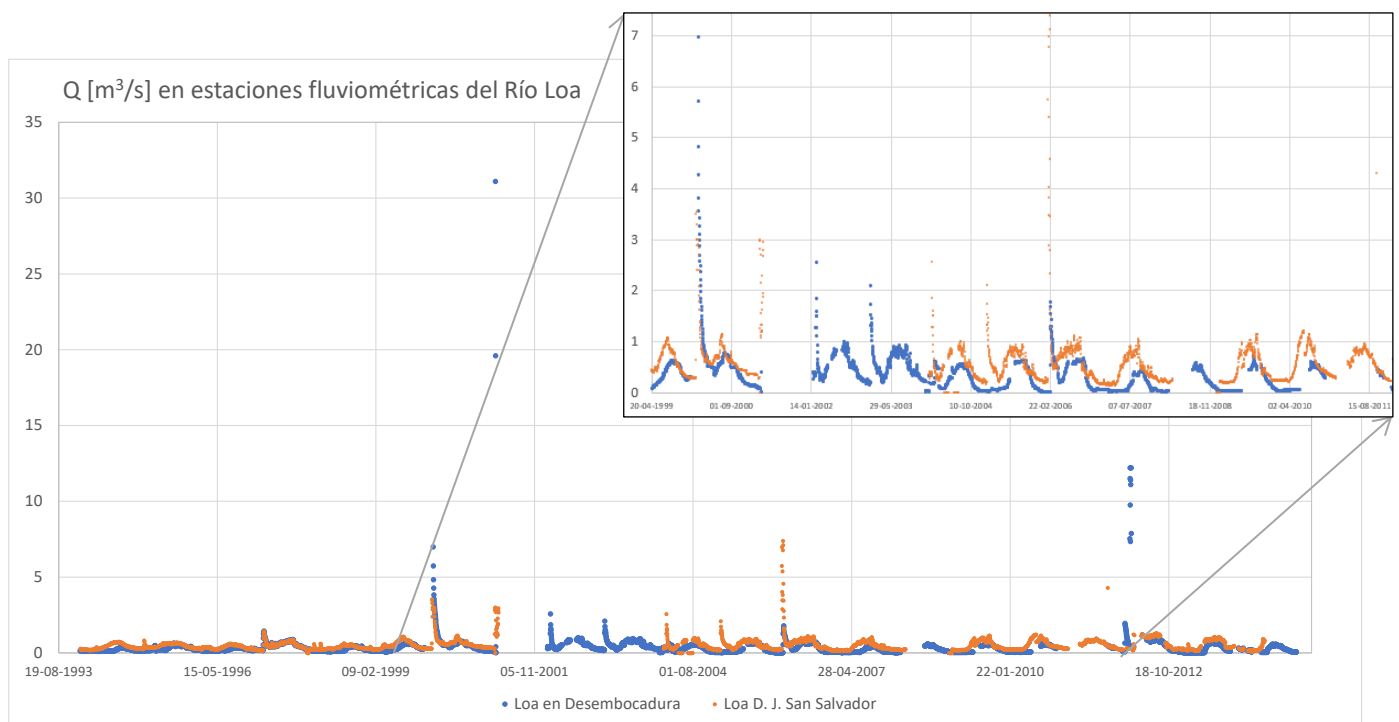
En consecuencia, para completar los datos de caudales de la estación fluviométrica Río Loa en Desembocadura, se utilizó la metodología de regresión simple descrita en Mfwango *et al.* (2018), basada en información de una estación fluviométrica ubicada en el mismo cauce del río Loa, a 140 km aguas arriba: la estación Río Loa D. J. Río San Salvador (río Loa después de junta con río San Salvador, ver Figura 3 anterior). Esta estación cuenta con registro de caudales en varios de los períodos sin datos en la estación Río Loa en Desembocadura. En la Tabla 4 se presentan sus principales características.

**Tabla 4.** Características de estación de control fluviométrico DGA Río Loa D. J. San Salvador.

Parámetro		Valor
Código BNA		02112007-3
Coordenadas UTM Datum WGS84 Huso 19 Sur	Norte	7.528.707
	Este	441.613
Longitud		69° 33' 59"
Latitud		22° 20' 47"
Período de registro de caudales diarios		1993-2016 (incompleto)
Estado		Suspendida

A continuación, en la Figura 9 se muestran los registros de ambas estaciones entre el período 1994 a 2014.





**Figura 9.** Caudales registrados en estaciones Río Loa en Desembocadura y Río Loa D. J. San Salvador, período 1994 – 2014.

Aunque se esperaría que en la estación Loa en Desembocadura el río lleve un mayor caudal, asociado a una mayor superficie de drenaje del cauce en ese punto, se observa en la Figura 9 que la estación Loa D. J. San Salvador, ubicada aguas arriba, registra caudales más altos que la estación Loa en Desembocadura. Esto se puede explicar asumiendo una salida de caudal entre ambas estaciones, que de acuerdo con la gráfica, mantiene una tasa relativamente constante.

Por otra parte, se observa que la estación Loa D. J. San Salvador registra picos que no se ven reflejados en la estación Río Loa en Desembocadura y viceversa. Cabe señalar que la estación Loa D. J. San Salvador está directamente influenciada por la confluencia del río San Salvador, cauce que tiene su origen al oeste de Calama y se extiende paralelo al río Loa por el norte de éste, hasta su confluencia (ver Figura 8 anterior).

Dado que durante los eventos de crecidas se observan registros dispares en ambas estaciones estudiadas, el análisis de correlación se centrará en rellenar los datos faltantes de la estación Loa en Desembocadura en los períodos sin eventos de crecidas, cuando los registros en ambas estaciones muestran una tendencia similar.

Para ello, con base en la revisión de la estadística disponible, se toman en consideración los siguientes criterios:

1 - Se consideran los caudales registrados en la estación Loa en Desembocadura hasta un valor máximo de 0,75 m<sup>3</sup>/s (750 l/s). Como se aprecia en la Figura 9, estos caudales máximos por lo general quedan bien representados en la estadística disponible y se cuenta con el correspondiente registro en la estación Loa D. J. San Salvador en las mismas fechas.

2 - Dentro del rango de registros definido en el punto anterior, se descartan aquellos registros de la estación Loa D. J. San Salvador que representen picos sin relación con el registro de la estación Loa en Desembocadura. Para ello, se analizó el comportamiento de los registros disponibles en ambas estaciones. En la Tabla 5 se presentan los valores de los estadísticos obtenidos.

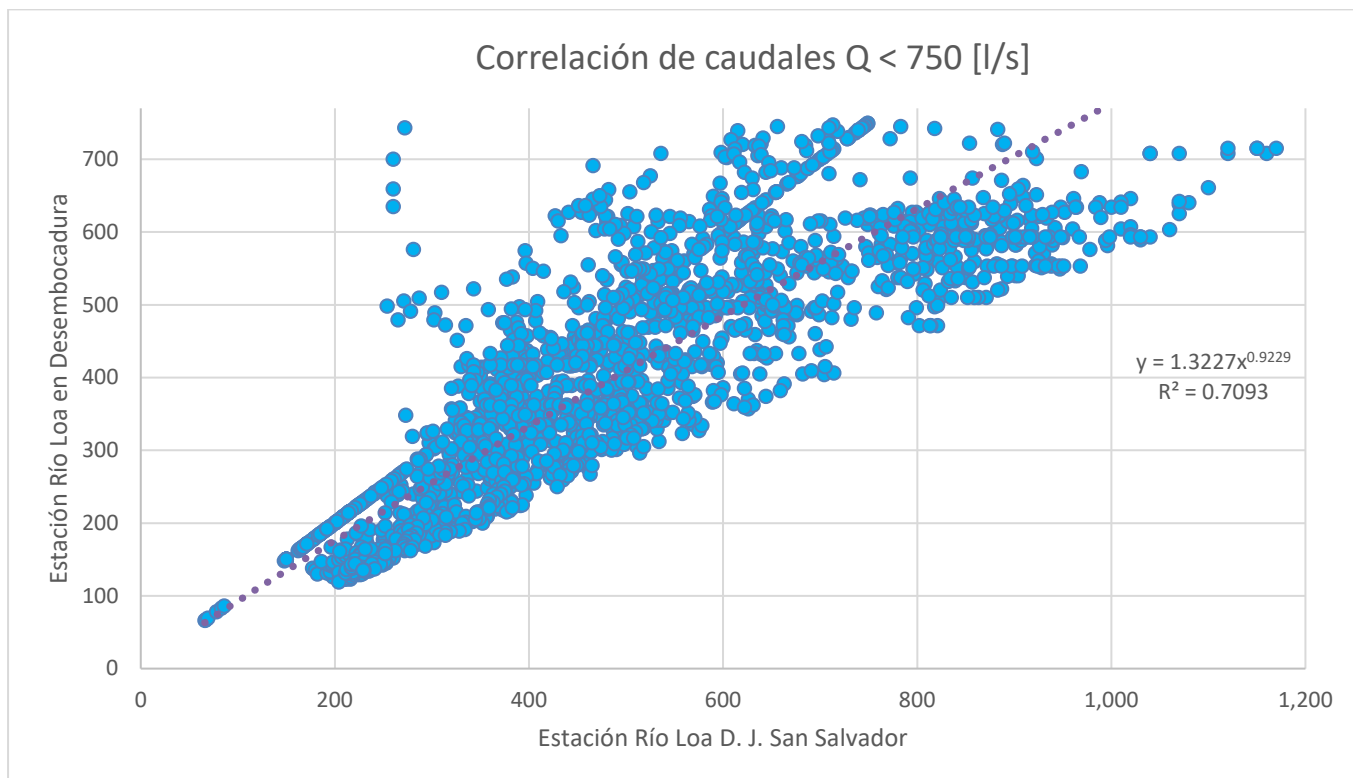
**Tabla 5.** Estadísticos de las estaciones de control fluviométrico DGA Río Loa en Desembocadura y Río Loa D. J. San Salvador.

<b>Parámetro</b>	<b>Loa en Desembocadura</b>	<b>Loa A. J. San Salvador</b>
Mínimo [m <sup>3</sup> /s]	0,010	0,066
Máximo [m <sup>3</sup> /s]	31,100	7,390
Promedio [m <sup>3</sup> /s]	0,344	0,517
Mediana [m <sup>3</sup> /s]	0,243	0,428

La relación entre el promedio de la estación Loa D. J. San Salvador sobre el promedio de la estación Loa en Desembocadura es de 1,5. La relación entre las medianas entre estas estaciones es de 1,76. A fin de basar la correlación en los datos que mantienen una relación entre ambas estaciones, se consideraron los caudales de la estación Loa D. J. San Salvador que cumplen con:

$$Q_{\text{Loa D. J. San Salvador}} < 1,76 \cdot Q_{\text{Loa en Desembocadura}}$$

De esta forma, se generó la correlación entre ambas estaciones, la cual se presenta a continuación, en la Figura 10.



**Figura 10.** Correlación entre estaciones fluviométricas Río Loa en Desembocadura y Río Loa D. J. San Salvador.

Se determinó una correlación potencial entre ambas estaciones estudiadas:

$$Q_{\text{Loa en Desembocadura}} = 1,3227 \cdot Q_{\text{Loa D. J. San Salvador}}^{0,9229}$$

A partir de la expresión de correlación determinada entre ambas estaciones, fue posible rellenar los registros de caudales diarios faltantes en la estación Río Loa en Desembocadura.

### 5.1.1. Entradas/salidas puntuales

El estudio “Análisis Integrado Río Loa, Región de Antofagasta” (DGA, 2014a) identifica tres (3) puntos de afloramiento en la cuenca del río Loa. El primer punto se ubica en el sector de Lequena, en que se observa una recuperación de aproximadamente 0,65 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, este punto es adyacente a la captación de aguas de la empresa sanitaria Aguas Antofagasta, de 0,50 m<sup>3</sup>/s. Por esta razón, se contabiliza un aporte total de 0,15 m<sup>3</sup>/s. El segundo punto se encuentra en el tramo del río Salado entre la junta con el río Curti y Sifón Ayquina, a causa de vertientes aportantes al cauce por hasta 0,28 m<sup>3</sup>/s. El tercer punto se encuentra en el tramo del río Loa entre Quillagua y la autopista Ruta 5, donde el afloramiento es de 0,07 m<sup>3</sup>/s.

Estos aportes se ingresan al modelo mediante archivos en formato CSV con el identificador COMID de la subcuenca a la cual pertenece el punto de afloramiento, su fecha de ocurrencia y caudal.

### 5.1.2. Datos de embalses

El caudal del río Loa está regulado en su parte alta por el Embalse Conchi (ver Figura 5). A través del módulo de embalses de Hydro-BID, fue posible ingresar al modelo las principales características operativas de este embalse, incorporando así su efecto a la simulación. A continuación, en la Tabla 6 se muestra la información del Embalse Conchi ingresada al modelo.

**Tabla 6.** Características del Embalse Conchi.

Parámetro	Valor
Identificador COMID de la cuenca donde se emplaza	313509800
Nombre	Conchi
Parámetro A	-1
Parámetro B	-2
Coeficiente de evaporación	1,1
Conductividad hidráulica [cm/día]	0,1
Mes de inicio de época sin crecidas	4
Mes de fin de época sin crecidas	12
Volumen principal o mínimo útil [millones de m <sup>3</sup> ]	14,3
Volumen de inundación o máximo [millones de m <sup>3</sup> ]	22
Volumen al inicio de la simulación [millones de m <sup>3</sup> ]	0
Descarga promedio diaria [m <sup>3</sup> /día]	77.760 (0,9 m <sup>3</sup> /s)

Cabe señalar que en los estudios oficiales del embalse Conchi no se define su filosofía de operación (Dirección de Obras Hidráulicas 2015), razón por la cual, para efectos de la modelación no se hizo una diferenciación mensual para la operación del embalse, definiéndose para todos los meses una descarga mínima de 6.912 m<sup>3</sup>/día (0,08 m<sup>3</sup>/s), una máxima de 1.296.000 m<sup>3</sup>/día (15 m<sup>3</sup>/s) y una demanda de 518.400 m<sup>3</sup>/día (6 m<sup>3</sup>/s). El procedimiento operativo seleccionado para la modelación fue el Procedimiento Operativo Lineal Estándar (*SLOP* por sus siglas en inglés), usado para mantener siempre un mínimo de flujo aguas abajo.

## 5.2. Modelación del Sistema en Hydro-BID

### 5.2.1. Calibración y validación del modelo

Con la información ingresada al modelo, se procedió a realizar la calibración de los parámetros hidrológicos de la cuenca del río Loa.

A continuación, en la Tabla 7 se presentan las variaciones realizadas en los parámetros hidrológicos de la cuenca del río Loa en cada iteración del proceso de calibración.

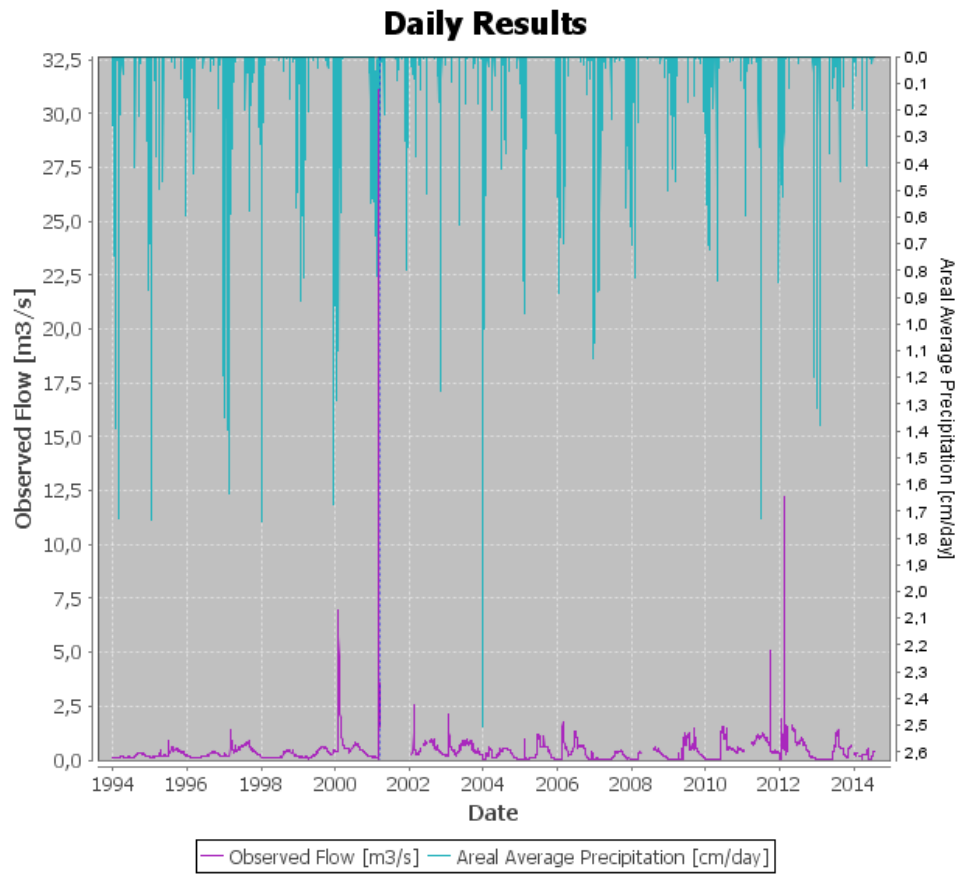
**Tabla 7.** Calibración del modelo Hydro-BID para la cuenca del río Loa.

<b>Parámetro</b>	<b>Iteración</b>			
	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Número de Curva*	0,8	0,8	<b>0,5</b>	0,5
AWC*	0,9	<b>1,1</b>	1,1	1,1
Coeficiente de Recesión RC	0,001	0,001	0,001	0,001
Infiltración	0,005	0,005	0,005	0,005
GS ET	1,1	1,1	1,1	<b>1</b>
DS ET	0,9	0,9	0,9	<b>1</b>
<b>Estadístico</b>				
Error volumen general (%)	178,91	109,76	35,14	<b>0,7</b>
Correlación (r)	0,27	0,24	0,45	0,46
Correlación modificada (Rmod)	0,03	0,03	0,09	0,12
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (R <sup>2</sup> )	-90,24	-78,12	-21,55	-12,05

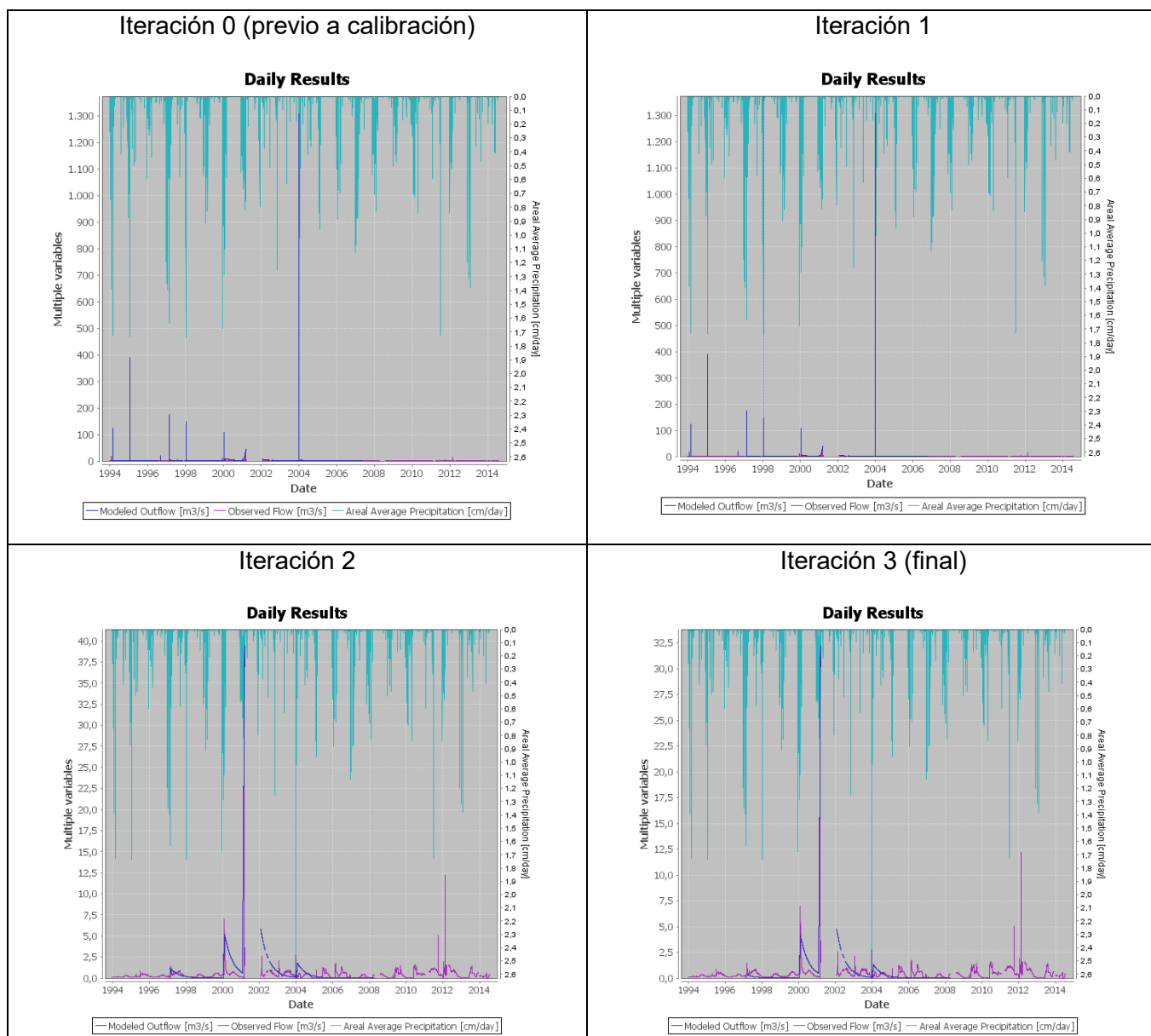
\*Los valores indicados para Número de Curva y AWC corresponden a multiplicadores de los valores que la base de datos de Hydro-BID tiene incorporados para cada cuenca.

Se observa que al disminuir el número de curva y considerando un aumento en el contenido disponible de agua en el suelo (AWC), se logra ajustar los caudales simulados de manera de representar un balance similar al observado con un error de volumen de 0,7%. Sin embargo, no se logra un buen ajuste de los estadísticos que correlacionan los caudales simulados con los observados. Tanto la correlación  $r$ , la correlación modificada y la eficiencia de Nash-Sutcliffe reflejan un mejor ajuste mientras su valor se acerca más a 1. Los nuevos intentos de ajustes en los parámetros de calibración no alcanzan mejores resultados de estos estadísticos y, al contrario, aumentan el error de volumen. Esta particularidad se analizará más adelante en esta sección, así como en la sección de Simulación de escenarios (sección 5.2.2) y de Discusión (sección 6) de este informe.

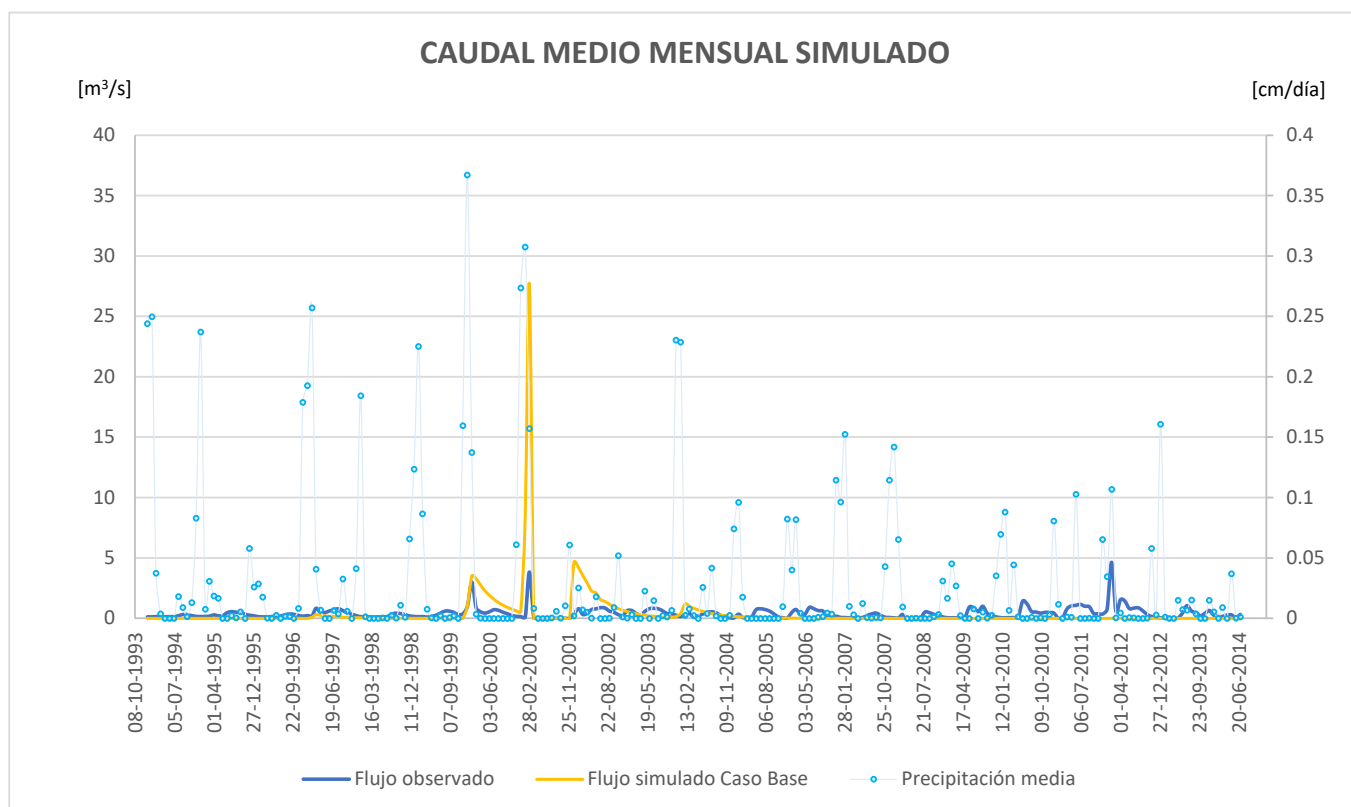
A continuación, en la Figura 11 se muestra la curva de caudales observados en la estación Río Loa en Desembocadura. En la Figura 12 se ilustran las curvas de evolución temporal de caudales simuladas en cada paso de la calibración. En el eje vertical derecho se grafican las precipitaciones.



**Figura 11.** Curva de evolución diaria de caudales observados en la estación fluviométrica Río Loa en Desembocadura.



**Figura 12.** Curvas de evolución temporal (diaria) de caudales observados y caudales simulados en la estación fluviométrica Río Loa en Desembocadura, entregada por Hydro-BID.



**Figura 13.** Curva de evolución mensual de caudales observados en la estación fluviométrica Río Loa en Desembocadura, elaborada con los resultados de Hydro-BID.

Se observa en la Figura 12 que, previo a la calibración, los caudales simulados superaban con creces los valores de caudal observados en la estación Río Loa en Desembocadura, respondiendo de forma exagerada a los picos de precipitaciones. Esta respuesta se ajustó en las siguientes iteraciones; sin embargo, aun cuando el modelo logra reproducir mejor los picos de caudales asociados a precipitaciones, no reproduce adecuadamente las oscilaciones observadas de los caudales inferiores a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . En este sentido, la curva de la iteración 2 logra un mejor ajuste de las crecidas observadas, pero no representa bien los caudales más bajos, razón por la cual el error de volumen de esta iteración supera el 30% aceptable. Por otra parte, la falta de registros aun es patente en las curvas graficadas y altera negativamente el resultado de la simulación.

En cambio, en la Figura 13 se aprecia que el modelo tiende a reproducir las crecidas de caudales observados, aunque sin embargo, no se ajusta a la perfección. Los caudales observados muestran un comportamiento aparentemente independiente de la precipitación, factor que se debe a la presencia del Embalse Conchi. Dado que se desconoce la regla de operación precisa del embalse y cómo actuó en eventos específicos del período de simulación, el modelo asume un comportamiento general de acuerdo con los parámetros ingresados para todo evento, y se observa, en particular, que en 2001 la crecida simulada supera con creces el caudal observado en esa ocasión. Sin embargo, para las precipitaciones de principio del 2000, el modelo logra un buen ajuste con respecto al caudal observado.



Es importante notar que, a causa de la ocurrencia de crecidas de caudal de magnitud tan superior al caudal medio del cauce, el modelo termina trabajando a una escala magnificada y le atribuye una inercia artificial al sistema, manteniendo el efecto de las crecidas por gran parte del año, por lo general. Los caudales de crecidas decaen gradualmente, como se observa en las curvas de caudal simulado de la Figura 8.

Todo lo anterior afecta el ajuste de los datos simulados con los datos observados, situación que queda reflejada en los estadísticos de correlación y eficiencia de Nash-Sutcliffe (ver Tabla 7 de calibración).

No obstante, es necesario tener presente que Hydro-BID es un modelo para gestión de recursos hídricos y no específico para el análisis hidrodinámico: a pesar de observarse discrepancias en las curvas de caudales observados y simulados, finalmente, se está caracterizando de forma satisfactoria el volumen de agua que transita por la cuenca.

### **5.2.2. Simulación de escenarios**

Para realizar la evaluación y análisis de los escenarios definidos, se utilizó el módulo de escenarios climáticos de Hydro-BID. Antes de proceder, se establece como Caso Base (CB) a la situación simulada originalmente sin cambios, correspondiente a la simulación validada en el punto 5.2.1 anterior. A continuación, se describen los resultados obtenidos en el Caso Base y en cada uno de los escenarios definidos.

#### **1. Caso Base (CB)**

A continuación, en la Tabla 8 se muestra el balance realizado por Hydro-BID para el caso base, sin cambios en las precipitaciones o temperaturas del sistema.

**Tabla 8.** Balance hídrico del Caso Base (m³).

Año	Precipitaciones	Evapotranspiración	Escorrentía superficial	Descarga de aguas subsuperficiales	Flujo total	Δ almacenamiento insaturado	Δ almacenamiento saturado	Contribución neta de aguas subterráneas	Recarga	Error de balance de volumen
1994	1.909,30	1.909,30	0,00	0,00	0,00	68.536,00	0,00	0,00	0,00	-0,0003
1995	1.131,35	1.131,35	0,00	0,00	0,00	17.268,00	0,00	0,00	0,00	0,0000
1996	884,89	575,19	0,00	0,00	0,00	4.130,87	0,00	0,00	0,00	0,0088
1997	1.964,86	2.267,21	0,00	1,16	11.606,80	185.052,00	1.161,92	0,00	5,80	-0,0088
1998	929,59	929,59	0,00	0,18	1.839,56	11.245,60	182,85	0,00	0,92	0,0000
1999	1.804,77	1.523,14	0,00	0,02	204,90	48.483,20	20,37	0,00	0,10	0,0080
2000	1.856,13	1.434,16	0,00	15,07	150.658,00	317.773,00	15.079,30	0,00	75,25	0,0094
2001	2.473,72	1.491,84	0,00	118,14	1.181.420,00	389.636,00	118.258,00	0,00	590,12	0,0077
2002	725,51	1.114,94	0,00	19,26	192.599,00	232.467,00	19.144,40	0,00	96,20	-0,0143
2003	974,02	703,52	0,06	2,15	22.074,60	64.822,20	2.132,41	0,00	10,72	0,0073
2004	959,59	1.565,73	0,00	4,75	47.522,70	208.398,00	4.754,77	0,00	23,74	-0,0180
2005	933,73	630,57	0,00	0,61	6.115,02	103.877,00	607,84	0,00	3,05	0,0085
2006	1.055,66	1.174,54	0,00	0,07	681,12	32.176,20	67,70	0,00	0,34	-0,0034
2007	1.334,56	1.379,05	0,00	0,01	75,87	15.543,20	7,54	0,00	0,04	-0,0013
2008	757,35	896,76	0,00	0,00	8,43	13.158,50	0,84	0,00	0,00	-0,0039
2009	417,96	417,96	0,00	0,00	0,94	262,32	0,09	0,00	0,00	0,0000
2010	666,52	666,52	0,00	0,00	0,10	3.078,27	0,01	0,00	0,00	0,0000
2011	776,86	776,86	0,00	0,00	0,01	3.763,98	0,00	0,00	0,00	0,0000
2012	599,62	599,62	0,00	0,00	0,00	1.558,80	0,00	0,00	0,00	0,0000
2013	676,08	676,08	0,00	0,00	0,00	2.446,17	0,00	0,00	0,00	0,0000
2014	288,09	288,09	0,00	0,00	0,00	909,18	0,00	0,00	0,00	0,0000
<b>PROMEDIO</b>	<b>1.100,96</b>	<b>1.054,86</b>	<b>0,00</b>	<b>7,69</b>	<b>76.895,57</b>	<b>82.123,12</b>	<b>7.686,57</b>	<b>0,00</b>	<b>38,39</b>	<b>0,0000</b>

En la Tabla 8 se observa que la evapotranspiración efecto de las altas temperaturas en la parte media y baja de la cuenca consume gran parte de las aguas de precipitaciones, conformando una importante salida de aguas del sistema. La aridez de los suelos de la cuenca queda bien representada, hecho que valida los parámetros calibrados: se observa una cuota baja de saturación en los suelos, comparada con el almacenamiento en los estratos no saturados, propiciando una escorrentía superficial prácticamente nula en todos los años del período de estudio. Cabe recordar que los valores expuestos en la Tabla 8 corresponden a balances anuales, en que el período de escorrentía asociada a crecidas se limita a algunos meses. Esta particularidad en el balance también se debe al error del modelo. Si bien no se refleja en el error de volumen, este desajuste se observa en los estadísticos de correlación y en la eficiencia de Nash-Sutcliffe calculada por el modelo. El modelo representa bien una buena parte de los eventos de crecidas, pero tiende a subestimar los caudales bajos y sus oscilaciones, aproximándolos a cero.

El flujo total representado en el balance corresponde a la suma de la escorrentía superficial con el flujo base del cauce. Dado que el modelo estima una escorrentía superficial nula, la totalidad de este flujo queda dada por las aguas subterráneas. El modelo estima que el 1% de este total corresponde a flujo subsuperficial o cercano a la superficie, observables en los años en que el volumen del flujo total es significativo.

La contribución neta de aguas subterráneas al cauce se mantiene nula en el período de estudio y la recarga al acuífero queda asociada a la ocurrencia de almacenamiento en suelo saturado, aunque su volumen es del orden del 0,5% de éste.

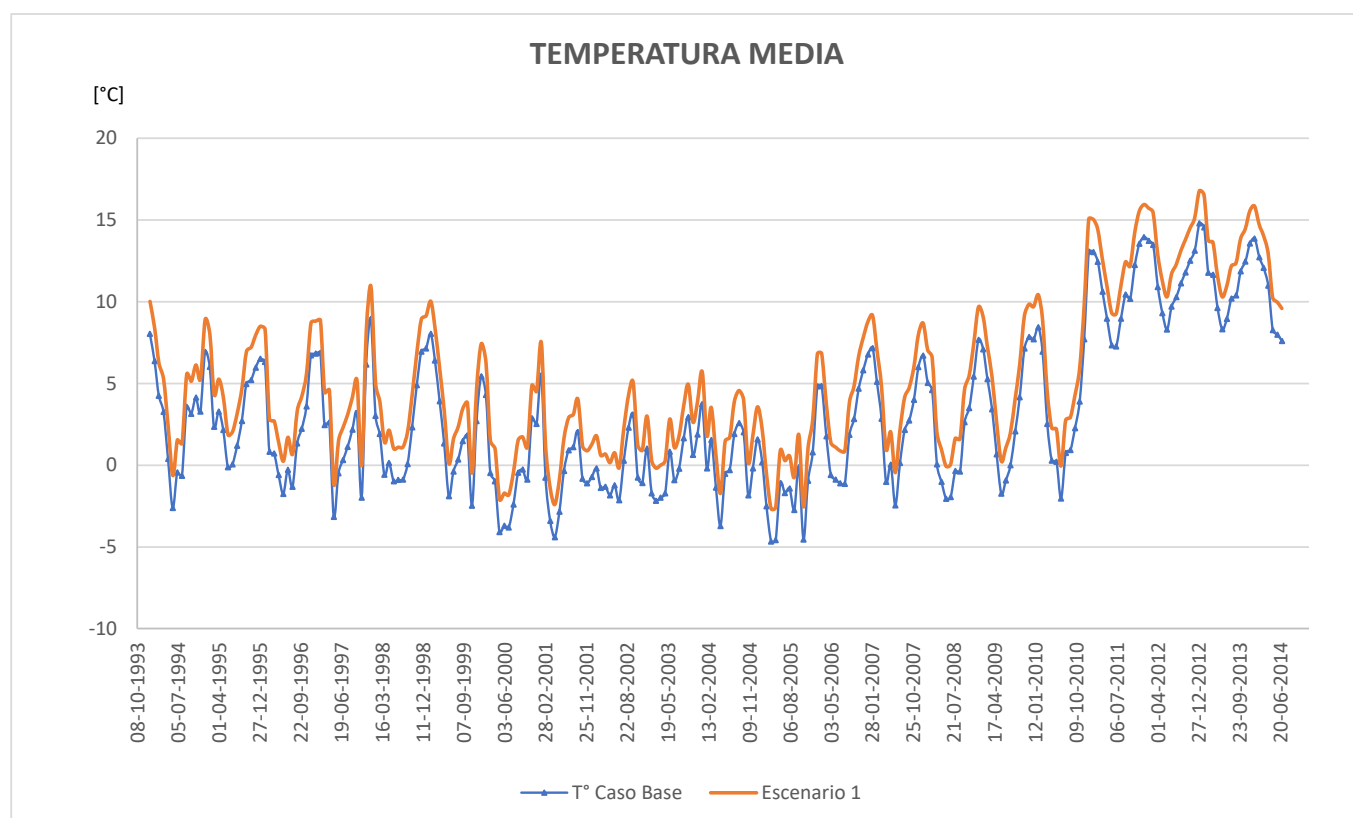
## 2. Escenario 1 (E1): Aumento de precipitación anual en 40%

A continuación, en la Tabla 9 se muestra el balance hídrico superficial realizado por Hydro-BID para E1, basado en la RCP8.5 del IPCC, con  $\Delta T = +2^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 9.** Balance hídrico del Escenario 1 (m<sup>3</sup>).

Año	Precipitaciones	Evapotranspiración	Escorrentía superficial	Descarga de aguas subsuperficiales	Flujo total	Δ almacenamiento insaturado	Δ almacenamiento saturado	Contribución neta de aguas subterráneas	Recarga	Error de balance de volumen
1994	1.909,30	1.909,30	0,00	0,00	0,00	37.812,10	0,00	0,00	0,00	-0,0003
1995	1.131,35	1.131,35	0,00	0,00	0,00	12.983,80	0,00	0,00	0,00	0,0000
1996	884,89	605,96	0,00	0,00	0,00	3.745,05	0,00	0,00	0,00	0,0079
1997	1.964,86	2.244,55	0,00	0,00	0,00	100.101,00	0,00	0,00	0,00	-0,0079
1998	929,59	929,59	0,00	0,00	0,00	8.329,96	0,00	0,00	0,00	0,0000
1999	1.804,77	1.568,22	0,00	0,00	0,00	32.842,20	0,00	0,00	0,00	0,0067
2000	1.856,13	2.032,11	0,00	8,35	83.473,70	213.787,00	8.354,89	0,00	41,70	-0,0064
2001	2.473,72	2.136,88	0,00	28,67	286.716,00	259.229,00	28.697,10	0,00	143,22	0,0047
2002	725,51	867,34	0,00	4,90	48.955,10	18.916,20	4.866,16	0,00	24,45	-0,0048
2003	974,02	341,95	0,06	0,55	6.074,83	3.183,66	542,02	0,00	2,72	0,0178
2004	959,59	1.575,69	0,00	2,12	21.220,90	119.754,00	2.123,54	0,00	10,60	-0,0178
2005	933,73	933,73	0,00	0,28	2.770,00	32.012,70	275,34	0,00	1,38	0,0000
2006	1.055,66	891,57	0,00	0,03	308,54	5.851,46	30,67	0,00	0,15	0,0046
2007	1.334,56	1.375,89	0,00	0,00	34,37	9.695,64	3,42	0,00	0,02	-0,0012
2008	757,35	879,78	0,00	0,00	3,82	9.018,88	0,38	0,00	0,00	-0,0035
2009	417,96	417,96	0,00	0,00	0,42	198,53	0,04	0,00	0,00	0,0000
2010	666,52	666,52	0,00	0,00	0,05	1.971,87	0,00	0,00	0,00	0,0000
2011	776,86	776,86	0,00	0,00	0,00	3.125,17	0,00	0,00	0,00	0,0000
2012	599,62	599,62	0,00	0,00	0,00	1.176,98	0,00	0,00	0,00	0,0000
2013	67,61	676,08	0,00	0,00	0,00	2.071,82	0,00	0,00	0,00	0,0000
2014	288,09	288,09	0,00	0,00	0,00	757,29	0,00	0,00	0,00	0,0000
<b>PROMEDIO</b>	<b>1.071,98</b>	<b>1.088,05</b>	<b>0,00</b>	<b>2,14</b>	<b>21.407,51</b>	<b>41.741,16</b>	<b>2.137,79</b>	<b>0,00</b>	<b>10,68</b>	<b>0,0000</b>

En la Tabla 9 es posible observar un efecto directo del aumento de la temperatura en la evapotranspiración anual: el aumento de temperatura ingresado provoca una mayor evapotranspiración. Este efecto se aprecia especialmente en los años 2000 y 2001, cuando ocurren las mayores precipitaciones. A causa de la evapotranspiración, este período muestra una reducción del almacenamiento de aguas en suelos saturados e insaturados. Hacia el año 2003, en cambio, las temperaturas no son suficientes para que la mayor salida del sistema sea la evapotransporación: se tiene el único año con un volumen final de escorrentía directa simulado por Hydro-BID. Para una mejor comprensión, en la Figura 14 se presenta la evolución de temperatura en el período de simulación.

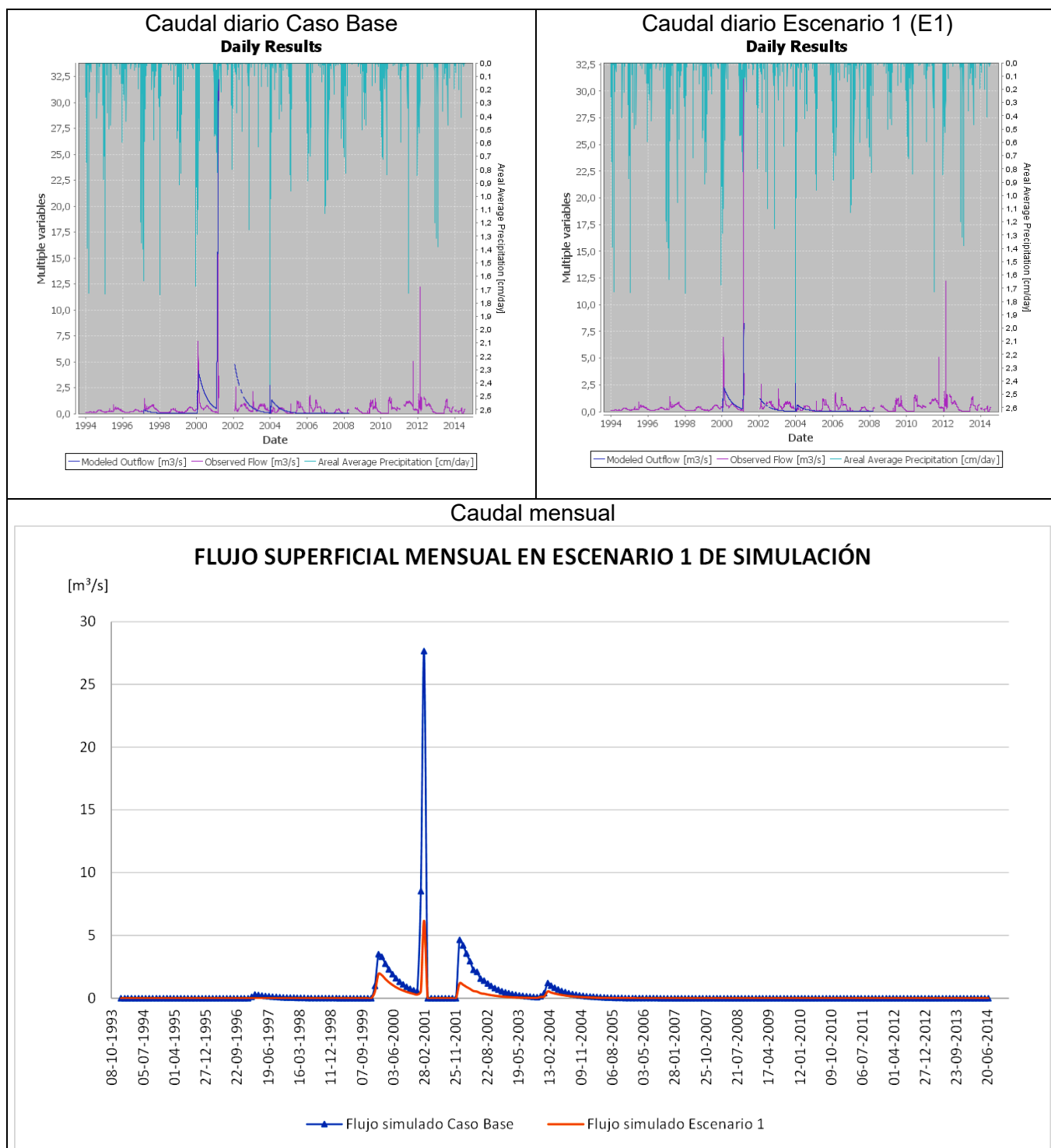


**Figura 14.** Curvas de evolución temporal de temperatura en Caso Base y Escenario 1.

De forma consecuente con la reducción del almacenamiento en suelos saturados, el volumen de recarga disminuye en la misma proporción.

Al igual que en el Caso Base, el balance no acusa la presencia de un volumen de aporte de las aguas subterráneas a la superficie.

En la Figura 15, a continuación, se ilustran los caudales simulados para el Escenario 1 con respecto al Caso Base.



**Figura 15.** Curvas de evolución temporal de caudales en Caso Base y Escenario 1.

Se observa en la Figura 15 que en E1 los picos del flujo simulado alcanzan magnitudes inferiores con respecto a su magnitud estimada en el Caso Base. Aparentemente, no se mantiene una misma proporción en todos los eventos de crecidas graficados. Esto se puede deber a la acción reguladora del Embalse Conchi. En el 2001, cuando en el Caso Base se produce el mayor pico del período simulado, en E1 el sistema probablemente amortigua el efecto de las fuertes precipitaciones a principio de año mediante la operación del embalse Conchi. Este desajuste queda reflejado en los estadísticos de correlación calculados por el modelo (ver Tabla 7 con parámetros de calibración).

3. Escenario 2 (E2): Aumento de temperatura anual en 1,84°C y aumento de precipitaciones en 3,2%

A continuación, en la Tabla 10 se muestra el balance realizado por Hydro-BID para el E2, en que la temperatura media sube en 1,84°C y las precipitaciones anuales se incrementan en un 3,2%.

**Tabla 10.** Balance hídrico del Escenario 2 (m³).

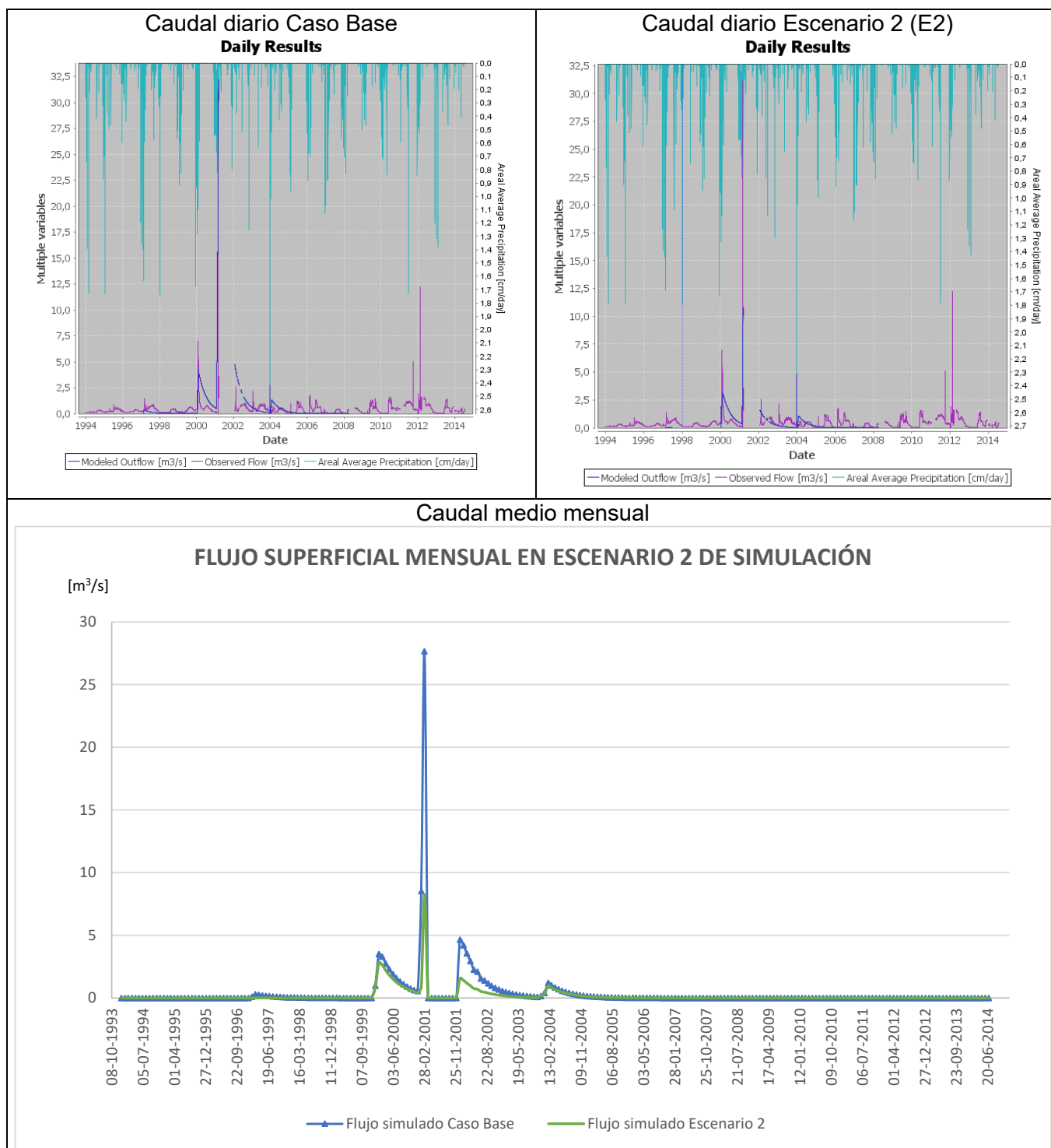
Año	Precipitaciones	Evapotranspiración	Escorrentía superficial	Descarga de aguas subsuperficiales	Flujo total	Δ almacenamiento insaturado	Δ almacenamiento saturado	Contribución neta de aguas subterráneas	Recarga	Error de balance de volumen
1994	1.970,40	1.970,40	0,00	0,00	0,00	43.501,90	0,00	0,00	0,00	-0,0003
1995	1.167,55	1.167,55	0,00	0,00	0,00	14.586,90	0,00	0,00	0,00	0,0000
1996	913,20	614,58	0,00	0,00	0,00	3.942,42	0,00	0,00	0,00	0,0084
1997	2.027,74	2.327,17	0,00	0,00	4,85	122.538,00	0,49	0,00	0,00	-0,0085
1998	959,34	959,34	0,00	0,00	0,77	9.217,21	0,08	0,00	0,00	0,0000
1999	1.862,52	1.608,12	0,00	0,00	0,09	37.318,60	0,01	0,00	0,00	0,0072
2000	1.915,53	2.026,67	0,00	12,04	120.396,00	237.924,00	12.050,40	0,00	60,14	-0,0052
2001	2.552,88	2.112,56	0,00	37,71	377.132,00	290.105,00	37.745,60	0,00	188,38	0,0061
2002	748,73	990,36	0,00	6,40	63.999,90	27.154,60	6.361,62	0,00	31,97	-0,0079
2003	1.005,19	350,50	0,11	0,71	8.263,66	3.566,02	708,59	0,00	3,56	0,0184
2004	990,30	1.617,40	0,00	3,82	38.202,70	131.994,00	3.823,05	0,00	19,08	-0,0184
2005	963,61	963,61	0,00	0,49	4.918,28	38.692,90	488,88	0,00	2,46	-0,0001
2006	1.089,44	913,03	0,00	0,05	547,82	6.450,85	54,45	0,00	0,27	0,0050
2007	1.377,27	1.421,00	0,00	0,01	61,02	11.152,80	6,07	0,00	0,03	-0,0012
2008	781,59	913,89	0,00	0,00	6,78	10.593,40	0,67	0,00	0,00	-0,0037
2009	431,34	431,34	0,00	0,00	0,75	222,17	0,07	0,00	0,00	0,0000
2010	687,85	687,85	0,00	0,00	0,08	2.190,13	0,01	0,00	0,00	0,0000
2011	801,72	801,72	0,00	0,00	0,01	3.430,34	0,00	0,00	0,00	0,0000
2012	618,81	618,81	0,00	0,00	0,00	1.342,27	0,00	0,00	0,00	0,0000
2013	697,71	697,71	0,00	0,00	0,00	2.262,49	0,00	0,00	0,00	0,0000
2014	297,31	297,31	0,00	0,00	0,00	831,86	0,00	0,00	0,00	0,0000
<b>PROMEDIO</b>	<b>1.136,19</b>	<b>1.118,61</b>	<b>0,01</b>	<b>2,92</b>	<b>29.215,94</b>	<b>47.572,28</b>	<b>2.916,19</b>	<b>0,00</b>	<b>14,57</b>	<b>0,0000</b>



En la Tabla 10 se observan las precipitaciones aumentadas por el modificador incluido en el modelo para el Escenario 2 (E2). Sin embargo, en casi la totalidad del período, esta entrada no se convierte en escorrentía superficial, puesto que el efecto de la evapotranspiración es superior, con excepción del año 2003, en que la temperatura media no propicia este efecto, como se vio en el análisis del Escenario 1.

El incremento del almacenamiento no saturado y saturado se centra principalmente en el año 2001, coincidente con el volumen más alto de precipitaciones en la cuenca. De la misma forma, la recarga alcanza su máximo en 2001. El modelo no asigna un aporte de aguas subterráneas al cauce en ningún año del período de simulación.

En la Figura 16, a continuación, se ilustran los caudales simulados para el Escenario 2 con respecto al Caso Base.

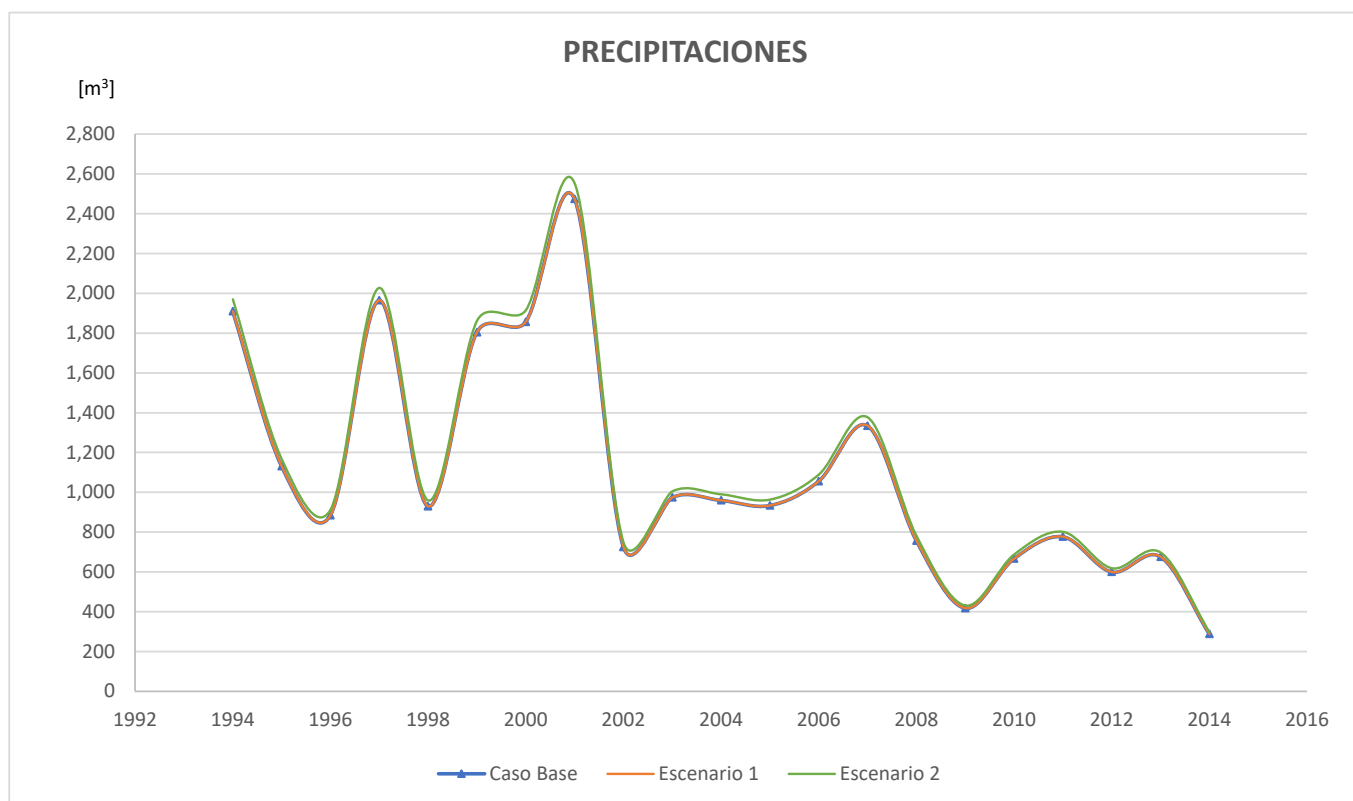


**Figura 16.** Curvas de evolución temporal de caudales en Caso Base y Escenario 2.

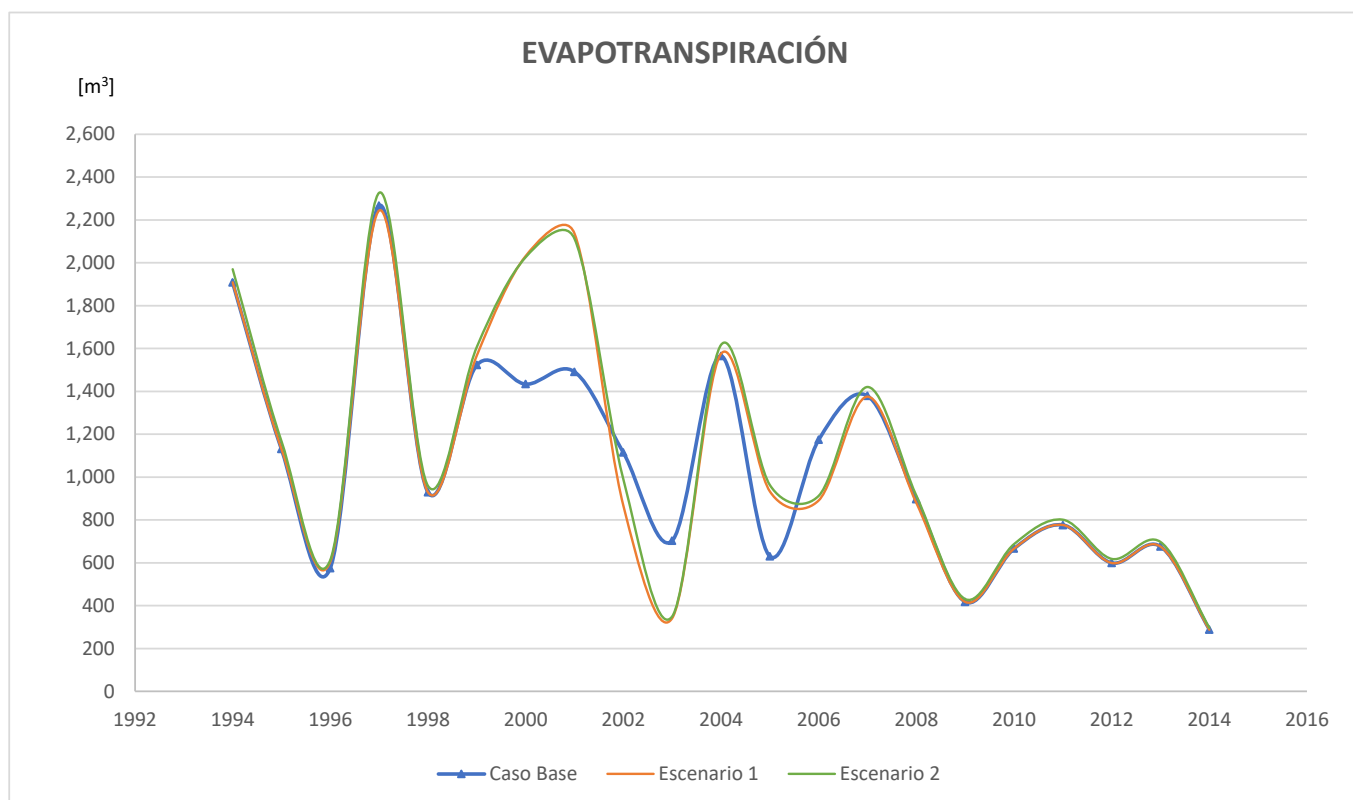
Se observa en la Figura 16 que los caudales de crecida simulados en E2 con respecto al CB son mayores que para E1. Este resultado es esperable, dado que para E1 el incremento de temperatura es más pronunciado, sin un aumento en las precipitaciones.

#### 4. Resumen

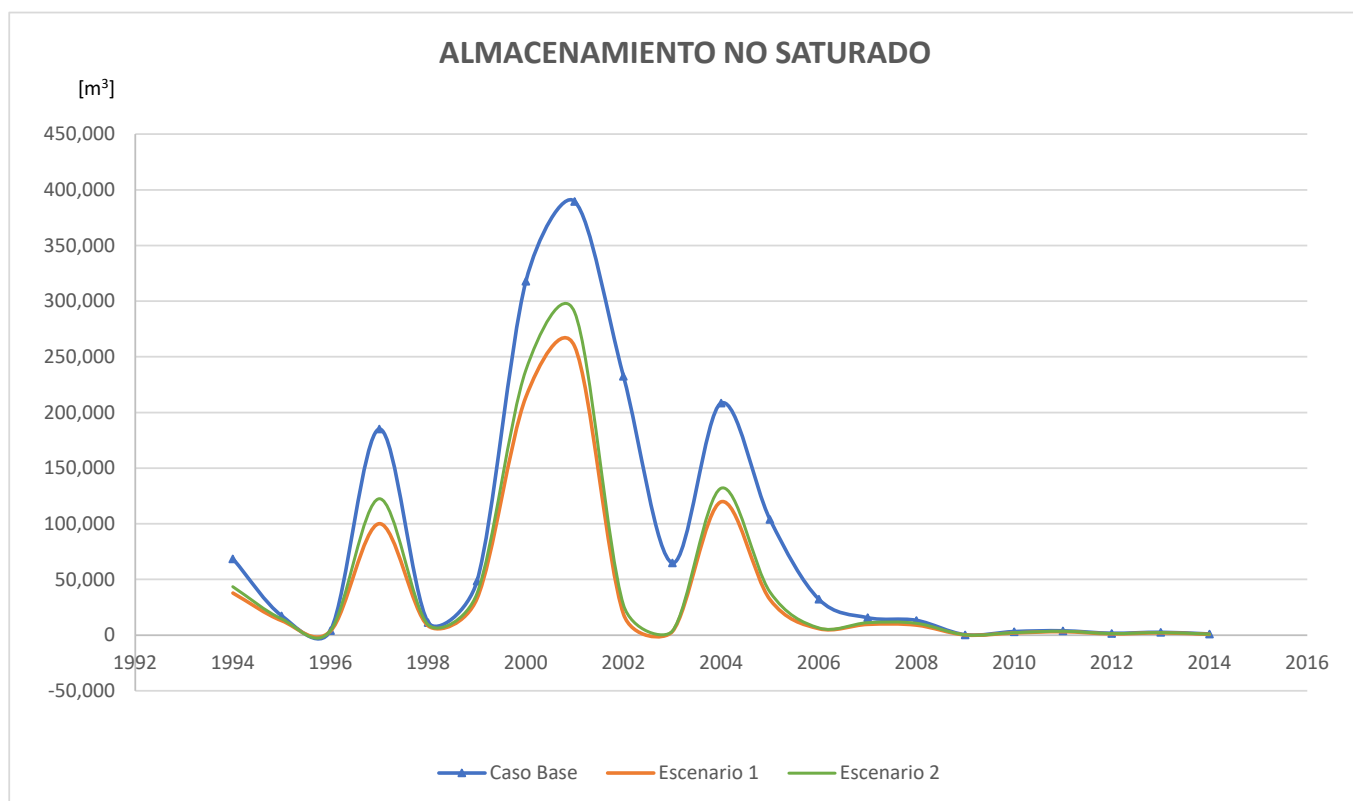
Para una mejor visualización de las conclusiones anteriormente expuestas, a continuación, se presentan en forma gráfica la evolución de los volúmenes de precipitaciones, evapotranspiración, almacenamiento no saturado, almacenamiento saturado y recarga, así como el caudal de salida en el río Loa para los escenarios estudiados.



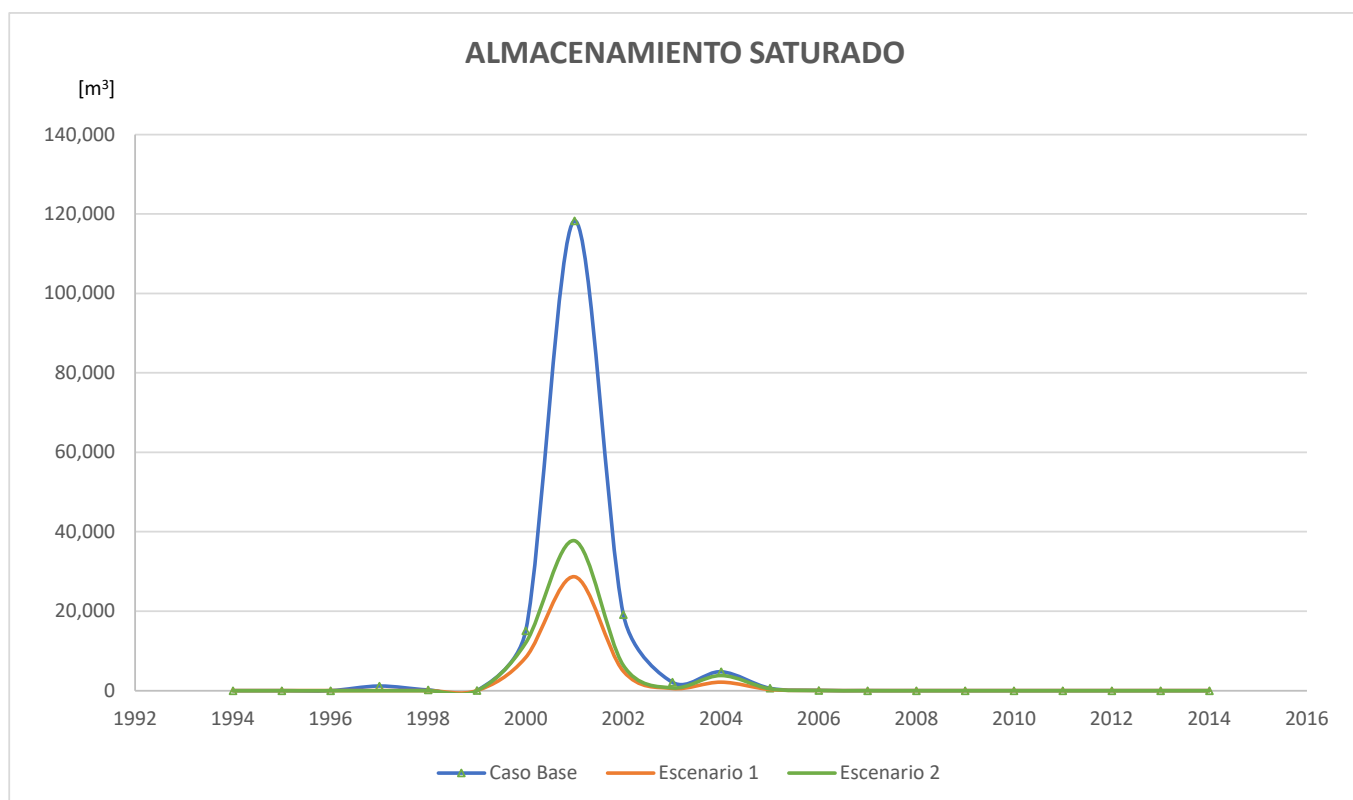
**Figura 17.** Curvas de evolución temporal de precipitaciones.



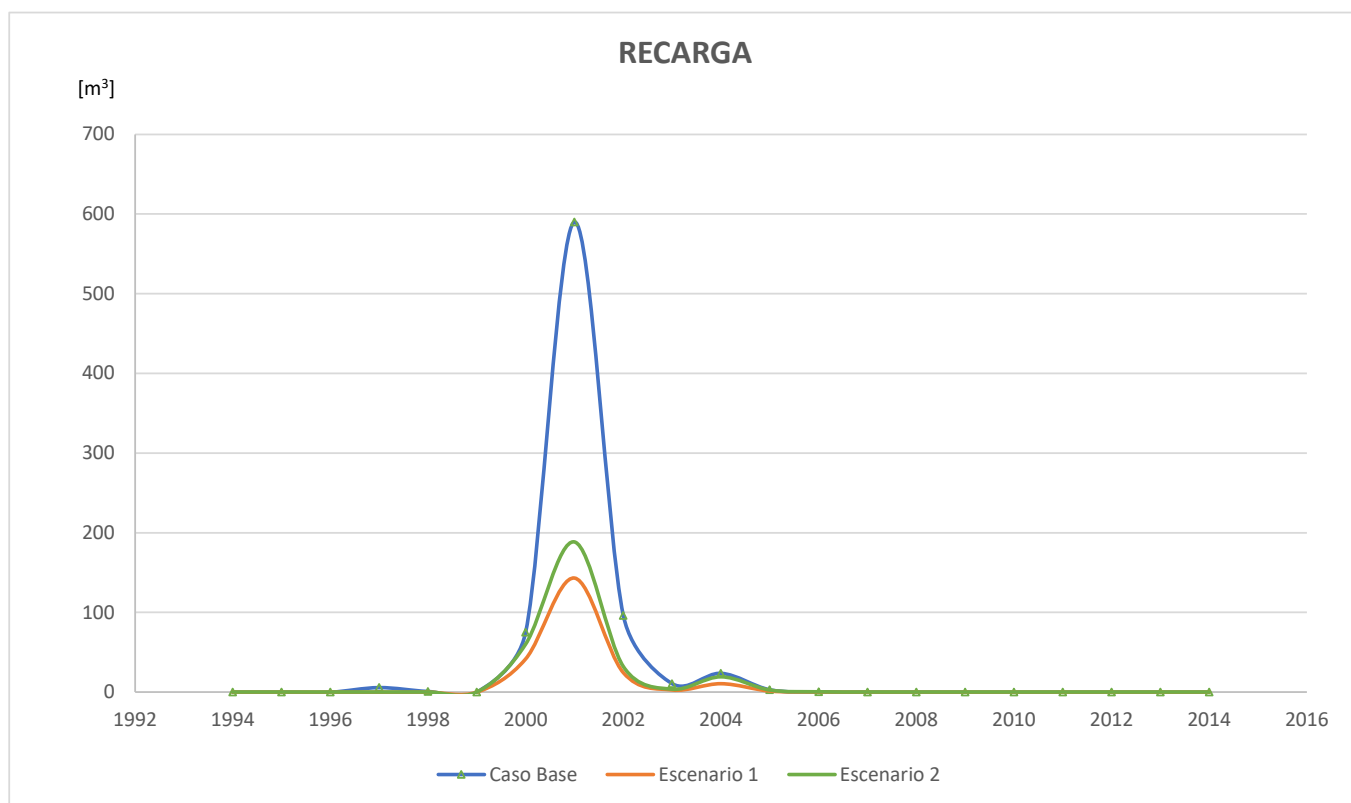
**Figura 18.** Curvas de evolución temporal de evapotranspiración.



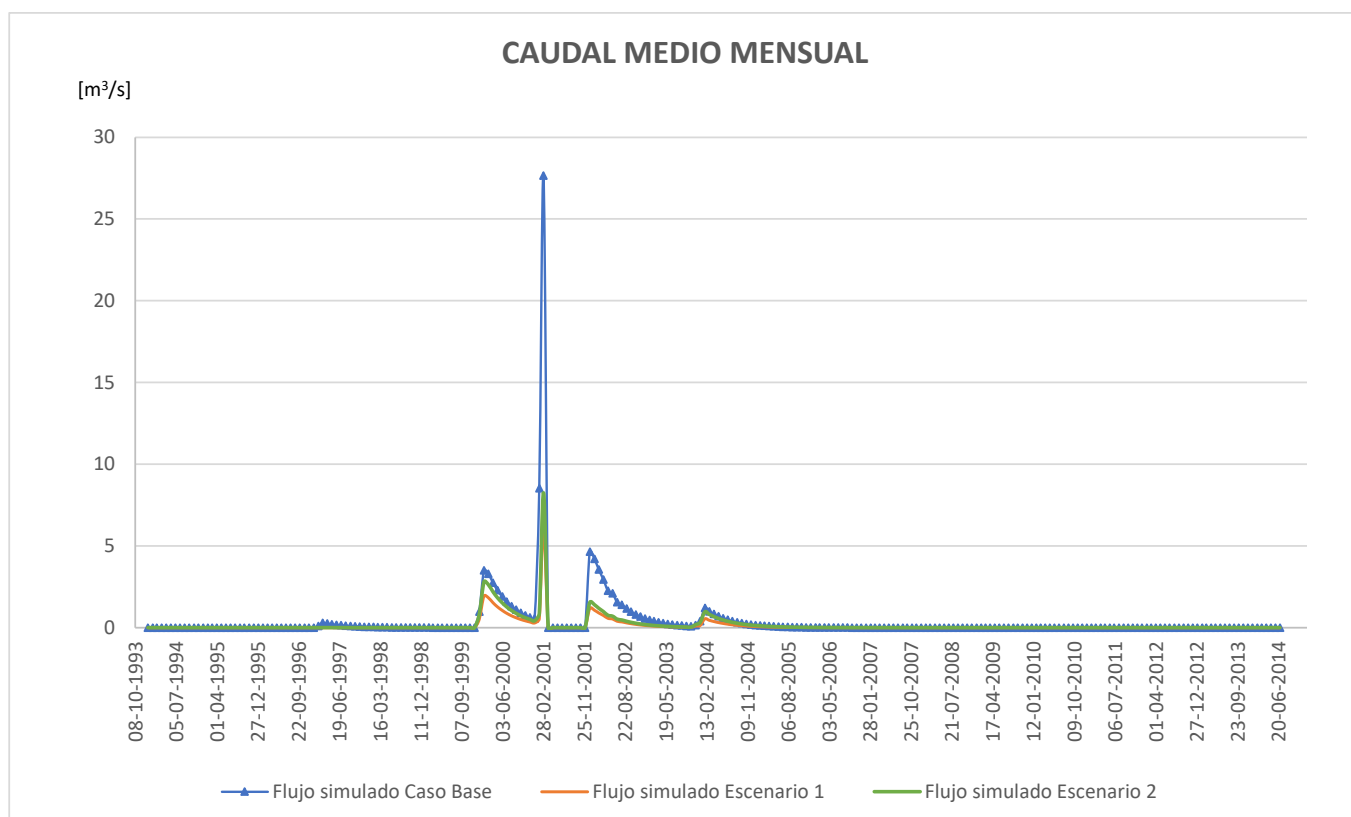
**Figura 19.** Curvas de evolución temporal de almacenamiento no saturado.



**Figura 20.** Curvas de evolución temporal de almacenamiento saturado.



**Figura 21.** Curvas de evolución temporal de recarga.



**Figura 22.** Curvas de evolución temporal de caudal.

## 6. DISCUSIÓN

Es importante tener en consideración que para concluir acerca de cuál es la variable hidrológica más relevante en el comportamiento del río Loa, se debe considerar su contexto geográfico. De acuerdo con los resultados de los escenarios simulados, el factor determinante en sus crecidas corresponde al volumen de precipitaciones. Sin embargo, es relevante observar el contraste anual entre las fuertes precipitaciones de diciembre a marzo con la sequía imperante el resto del año. Estas lluvias ocurren por el fenómeno meteorológico de invierno boliviano en la parte alta de la cuenca y pueden considerarse un evento excepcional, a pesar de su frecuencia. Si estas lluvias fuesen comunes a lo largo de todo el año, es probable que la sensibilidad del sistema a los cambios hipotéticos propuestos a través de los escenarios analizados en este estudio, fuese menos determinante. Entonces, al decir que las precipitaciones son el factor más relevante en el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Loa, es importante tener en consideración la naturaleza de éstas.

En particular, el modelo Hydro-BID no permite discernir de forma rápida y gráfica los puntos del cauce donde ocurren mayores crecidas sin el apoyo de una plataforma SIG, por ser un software de gestión de aguas que se centra en obtener un balance hídrico representativo y no el comportamiento hidrodinámico de los cauces. Cabe recordar que el modelo toma los registros meteorológicos de diferentes puntos de la cuenca y realiza una interpolación a través de una plataforma propia, con el fin de asignar un valor de precipitación para cada una de las subcuenas de su base de datos. En consecuencia, para simular un escenario en que las precipitaciones se encuentren distribuidas a lo largo de la cuenca (y no principalmente en su cabecera, como es el caso del río Loa), sería necesario modificar los archivos climáticos de entrada al modelo y volver a interpolar. Estos archivos contienen datos procedentes de las estaciones o puntos de control meteorológicos que, por su formato, no son triviales de modificar con la frecuencia que requiere este tipo de análisis. Sería ideal llevar los datos y resultados del balance de cada subcuenca a una plataforma SIG, donde visualizar espacialmente las variables de interés.

Por otra parte, Hydro-BID permitió un muy buen análisis gráfico del comportamiento hidrológico de la cuenca en estudio, factor que se mostró de suma importancia para la comprensión del sistema. Esta herramienta fue clave en el análisis de los resultados del balance hídrico para cada escenario simulado, en particular, al ilustrar claramente la situación estudiada con respecto a los datos observados. Asimismo, su plataforma de escenarios climáticos permite evaluar diferentes condiciones de forma bastante ágil y sencilla.

Desde un punto de vista general, es importante recordar que la base de datos hidrológicos de Hydro-BID fue construida para Latinoamérica y El Caribe; sin embargo, son pocos los países cuyas hoyas hidrográficas presentan una influencia nival determinante, como Chile. Al tratarse de un país estrecho limitado por la Cordillera de los Andes a oriente y el océano Pacífico al poniente, las cabeceras de varias cuencas reciben aguas de deshielo en los meses de verano (fines de diciembre a marzo). En el caso

particular de la cuenca del río Loa, su parte alta recibe directamente precipitaciones líquidas asociadas a los fenómenos meteorológicos del altiplano cordillerano, las cuales ocasionan crecidas importantes en un cauce que porta normalmente caudales muy bajos. Para efectos de la modelación en Hydro-BID, fue muy difícil ajustar los caudales simulados a una curva de caudales observados con variaciones tan grandes. No se obtuvo una buena correlación y los valores de los estadísticos de ajuste lo reflejan.

Otro factor que afectó el ajuste del modelo fue la falta de datos en ciertos períodos. La cuenca en estudio carece de una red de monitoreo de caudales robusta, bien distribuida, con una buena frecuencia de monitoreo y de alta confiabilidad. El mismo formato de los registros de las estaciones de control fluviométrico oficiales de la DGA muestra poca compatibilidad con la elaboración de bases de datos, situación que de mejorarse, facilitaría la elaboración de análisis estadísticos. Por otra parte, sus estaciones muestran períodos extensos sin registro. Esta situación generó la necesidad de apoyarse en un modelo atmosférico global para obtener una cantidad suficiente de datos meteorológicos, situación que no es ideal.

Finalmente, la falta de información acerca de la operación del embalse Conchi en la parte alta de la cuenca del río Loa afecta la simulación, puesto que el embalse es capaz de amortiguar el efecto de algunas precipitaciones de acuerdo con su volumen disponible a la fecha del evento meteorológico y su regla de operación. Sin embargo, el desconocimiento de las reglas de operación históricas de este embalse causa inconsistencias en la aproximación de los caudales simulados con los observados, los cuales no siempre logran reproducir bien los eventos de crecida observados. En algunos eventos, el modelo no reproduce adecuadamente la crecida, mientras que en otros, la magnifica. Esta situación dificultó mucho la calibración del modelo hasta un rango óptimo de los estadísticos de ajuste. La calibración se tuvo que basar en el error de volumen, estadístico útil, pero que debe estar respaldado también por valores adecuados de correlación y eficiencia de Nash-Sutcliffe para una validación robusta.

Coincidentemente, las estaciones fluviométricas de un mismo tramo de cauce suelen presentar los mismos lapsos sin data, principalmente, durante eventos de crecida. Este hecho refuerza la idea de que sería adecuado mejorar el diseño de estas estaciones y su tecnología para evitar que se dañen ante estos eventos, facilitando una buena continuidad en el registro de caudales.

Debido al largo del cauce, el cual tiene su origen en el sector altiplánico, sería ideal realizar la calibración en más de un punto del cauce, de manera de caracterizar mejor los diferentes sectores. Sin embargo, este procedimiento se vio dificultado por la insuficiencia en el registro de las estaciones fluviométricas de interés y la dificultad para rellenar los períodos incompletos a falta de una estación cercana con un buen registro.



Es difícil realizar el relleno de datos de una estación fluviométrica del río Loa mediante otros registros de estaciones cercanas, dado que este río presenta muchas particularidades, como su extensión, naciente en altiplano a gran altura, influencia de invierno boliviano, etc. La selección de una estación representativa, en este caso, debe buscarse en el mismo cauce y, por lo tanto, es probable que se encuentre expuesta a los mismos problemas de registro.

Durante la recopilación de datos de caudales, precipitaciones y temperatura para el ingreso al modelo, no se encontró información correspondiente al período de 2019 en que se registró la crecida de referencia que motivó este estudio en el río Loa. No fue posible, en consecuencia, comparar las crecidas observadas y simuladas con ese evento particular, para encontrar sus causas específicas. Sin embargo, la dinámica hidrológica del río Loa quedó identificada a través del modelo utilizado y, aun sin los datos de referencia, fue posible concluir acerca de los factores más influyentes en las crecidas de gran magnitud en el río.

Es así que, a pesar de que no se logró un ajuste óptimo a nivel gráfico por las condiciones antes descritas, la visualización del sistema del río Loa a través del modelo y la simulación de los escenarios de interés, entregaron la información suficiente para entender su comportamiento y cumplir el objetivo planteado.

Finalmente, a partir de la recopilación de información bibliográfica y de los resultados de las simulaciones, se hace notar que las grandes crecidas registradas en el cauce del río Loa no responden a influencias antrópicas, como serían la modificación de su cauce, la modificación del uso de suelos en una superficie amplia de la cuenca o los problemas de operación de embalses. La causa principal de su ocurrencia corresponde a un fenómeno meteorológico anual, lo que hace muy probable la ocurrencia de eventos de crecidas con una frecuencia similar a la actual, dependiendo de la magnitud de las precipitaciones altiplánicas. En este marco, una forma eficaz de controlar sus efectos sería optimizar la operación del embalse Conchi con una fuerte orientación al control de crecidas, y complementarlo con la construcción de uno o más embalses en puntos estratégicos del cauce, a fin de proteger las zonas urbanas de crecidas extremas, sin afectar la entrega de caudales para su uso en producción de agua potable, riego de zonas agrícolas y actividades mineras.

## 7. CONCLUSIONES

1. La modelación de la cuenca del río Loa mediante el software Hydro-BID permitió caracterizar su comportamiento hidrológico a partir de las variables modeladas para la estación Río Loa en Desembocadura, en el período comprendido entre 1994 y 2014. A nivel de balance anual, la evapotranspiración efecto de las altas temperaturas en la parte media y baja de la cuenca consume gran parte de las aguas de precipitaciones y conforma la salida de aguas más significativa del sistema. Se observa una cuota baja de saturación en los suelos, comparada con el almacenamiento en los estratos no saturados, consecuente con la aridez característica del clima desértico que la abarca. Estas condiciones dan lugar a una escorrentía superficial escasa en gran parte del período de años del balance hídrico realizado por el modelo. De acuerdo con los resultados del modelo, no se estima una contribución del volumen de aguas subterráneas al cauce. La recarga al acuífero sigue la tendencia del almacenamiento en suelo saturado y se mantiene muy baja en el período de simulación.
2. La baja magnitud de la escorrentía en el balance hídrico realizado por el modelo se atribuye a dos causas. La primera se refiere al comportamiento del sistema, en que el período de escorrentía superficial asociada a crecidas es acotado en el año y su volumen se transfiere a otras variables de salida del sistema. La segunda concierne al modelo: debido a que el ajuste entre los caudales simulados y los caudales observados no es exacto, la curva de caudales resultante representa bien los picos de crecidas, pero tiende a subestimar los caudales bajos y sus oscilaciones, aproximándolos a cero.
3. No se observó una consistencia en la diferencia entre los caudales simulados con respecto a los caudales observados en la estación Río Loa en Desembocadura a lo largo del tiempo. Para algunos picos de precipitación, la respuesta de los caudales simulados es muy superior a los observados, mientras que para magnitudes aun mayores de lluvias, se logra un buen ajuste. Esta inconsistencia se atribuye a la operación del Embalse Conchi en la parte alta de la cuenca. Las reglas de operación de este embalse son desconocidas y es válido suponer que no ha operado de la misma manera a lo largo de los años. A falta de esta información, las simulaciones contemplan un funcionamiento uniforme de este embalse. Por otra parte, Hydro-BID no proporciona a priori una visualización gráfica de dónde se concentran las precipitaciones en la cuenca (aguas arriba o aguas abajo del embalse), de manera que no es directo concluir al respecto.
4. La simulación de escenarios permitió evaluar el efecto que tienen las variaciones de precipitaciones y temperatura en el sistema. Las variaciones simuladas están dentro del marco definido por la IPCC de las Naciones Unidas y el modelo de circulación general CSIRO-Mk2 para

el cambio climático. Al simular un incremento en las temperaturas, se obtuvo un incremento importante en la evapotranspiración, que redujo significativamente el caudal simulado. Al sumar a ello un incremento en las precipitaciones, se observó un aumento en la saturación de los suelos y en el caudal superficial mensual. Sin embargo, la mayor parte de este ingreso al sistema se transforma en evapotranspiración.

5. La recarga al acuífero no se ve necesariamente favorecida por un escenario de mayores precipitaciones, en caso de que además se contemple un aumento de temperatura. En este caso, como se explica en el punto anterior, los rangos de temperatura presentes en el área de estudio propician el fenómeno de evapotranspiración sobre la escorrentía superficial y la recarga.
6. Las elevadas precipitaciones de verano en la cuenca del río Loa son el factor más influyente en su comportamiento hidrológico. Los escenarios de simulación en que se introducen cambios realistas de temperatura y precipitaciones, dentro de lo esperable de acuerdo con la proyección de cambio climático, generan modificaciones moderadas en los caudales que no modifican la ocurrencia de crecidas en el río en los mismos períodos. Estas crecidas están condicionadas por las precipitaciones de alta magnitud de la parte alta de la cuenca. Sin embargo, sí se observa la influencia del cambio climático en cuanto a los volúmenes totales de evapotranspiración, percolación y recarga.
7. Al ser causadas por un fenómeno netamente natural, las crecidas del río Loa no pueden controlarse o amortiguarse desde su origen. Su ocurrencia no está influenciada por el cambio climático. El principal enfoque para evitar desbordes y daños a raíz de las crecidas extremas en su cauce sería la mitigación, a través de la optimización de la operación del embalse Conchi y la construcción de obras hidráulicas que, en conjunto, regulen el caudal en diferentes puntos del cauce, permitiendo la entrega de la demanda asociada a las actividades socio-económicas existentes y proyectadas, así como a las necesidades de caudal ambiental del cauce.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. (2019) Hydro-BID: Herramienta para el manejo y planificación del recurso hídrico en América Latina y el Caribe. Apuntes del curso.
- BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. (2017). Guía Paso a Paso - Manual de Hydro-BID. Washington. Estados Unidos.
- BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. (2014). Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Parte 2.
- DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS. (2015). Estudio de la inundación producida por caudales extremos vertidos desde el Embalse Conchi, Región de Antofagasta. Chile.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. (2014a). Análisis integrado Río Loa Región de Antofagasta. Chile.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. (2014a). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad - Cuenca Río Loa. Chile.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. (2012). Estudio acuífero de Calama sector medio del río Loa, Región de Antofagasta
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. (1996). Análisis de la oferta y demanda de recursos hídricos en cuencas críticas de Loa, Rapel y Mataquito. Chile.
- GLOBAL WEATHER DATA FOR SWAT <Accesible en URL: <https://globalweather.tamu.edu/>>
- HIRST, A. C., GORDON, H. B Y O'FARRELL, S. P. (1996). Global warming in a coupled climate model including oceanic eddy-induced advection. Geophysical Research Letters, 23 : 3361-3364.
- HIRST A.C., O'FARRELL S.P. AND GORDON H.B. (1999): Comparison of a coupled ocean-atmosphere model with and without oceanic eddy-induced advection. 1. Ocean spin-up and control integrations. J. Climate, submitted.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. DATA DISTRIBUTION CENTRE. What is a GCM? <Accesible en URL: [https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm\\_guide.html](https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html)>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. DATA DISTRIBUTION CENTRE. GFDL-R15 GCM Model Information <Accesible en URL: [http://www.ipcc-data.org/sim/gcm\\_clim/IS92A\\_SAR/gfdlr15\\_info.html](http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_clim/IS92A_SAR/gfdlr15_info.html)>
- LA TERCERA. (2019). ¿Por qué se producen las lluvias altiplánicas? <Accesible en URL: <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/se-producen-las-lluvias-altiplanicas/512076/>>
- METEOCHILE BLOG. BLOG OFICIAL DE LA DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE. Tormentas en el Altiplano: Un verano fuera de lo común. <Accesible en URL: <http://blog.meteochile.gob.cl/2018/03/08/tormentas-en-el-altiplano-un-verano-fuera-de-lo-comun/>>